

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ В. И. Харук

« ____ » _____ 2017 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**Гравиметрическая спутниковая съемка в анализе динамики водного
эквивалента массы континентальной поверхности Земли**

09.04.01 Информатика и вычислительная техника

09.04.01.07 Дистанционное зондирование и ГИС-технологии в мониторинге
природных и антропогенных экосистем

Научный руководитель _____ д. б. н., проф. В. И. Харук
подпись, дата

Выпускник _____ В. В. Шабалов
подпись, дата

Рецензент _____ С. Н. С., К. Т. Н. С. Т. Им
подпись, дата

Нормоконтролер _____ Е. В. Федотова
подпись, дата

Красноярск 2017

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ В. И. Харук

подпись

«_____» _____ 2017 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Студенту Шабалову Василию Владимировичу

Группа: КИ15-01-7М Направление (специальность): 09.04.01

Информатика и вычислительная техника

Тема выпускной квалификационной работы: «Гравиметрическая спутниковая съемка в анализе динамики водного эквивалента массы континентальной поверхности Земли»

Утверждена приказом по университету № 5833/с от 29.04.2016 г.

Руководитель ВКР: Харук В. И., д. б. н., профессор кафедры Б-ГИС

Исходные данные для ВКР: GRACE (2002-2015 гг.), SPEI v. 2.4 (2002-2015 гг.), CRU TS v. 3.24 (2002-2015 гг.)

Перечень разделов ВКР: введение; обзор литературы по проблеме анализа динамики водной массы; объекты исследования; исходные данные для анализа климатических изменений; результат анализа данных; заключение; список сокращений; список использованных источников.

Перечень графического материала: слайды презентации.

Руководитель ВКР _____
подпись

В. И. Харук

Задание принял к исполнению _____
подпись

В. В. Шабалов

« 29 » мая 2017 г.

АННОТАЦИЯ

При изучении изменения глобального климата чрезвычайно важно заниматься мониторингом климатических показателей, а также АЭВМ.

Анализ литературы позволяет сделать вывод, что с помощью гравиметрической спутниковой съемки возможно оценить динамику АВЭМ. Представленные результаты показали согласованность с научными работами других авторов.

На большей территории Евразии установился возрастающий тренд АВЭМ. Выделяются зоны со значимыми возрастающими и убывающими трендами: Гималаи и Сирия, где отмечается убывающий тренд и Китай - возрастающий тренд. График минимумов АВЭМ за июнь-октябрь 2002-2015 гг. показывает значимый убывающий тренд.

Горная система Гималаи и Тибетское плато разделены друг от друга с помощью SRTM. На горной системе отмечается убывающий тренд, на плато – возрастающий. Увеличение АВЭМ в области плато связано с таянием льдов в горной: доступная водная масса тает и утекает по системе речной сети.

Для острова Гренландия построена карта-схема трендов АВЭМ, на которой отмечается, что в целом на острове установился значимый убывающий тренд. На острове установился тренд на потерю морского льда на юго-западной части материка.

Карта-схема трендов АВЭМ показывает возрастающий тренд в центральной части Северной Америки. Выделяются зоны со значимыми убывающими трендами (северо-восток, юго-запад). График минимумов АВЭМ за июнь-октябрь 2002-2015 показывает значимый убывающий тренд.

GRACE, SPEI, CRU TS, EWTA, АВЭМ, ЕВРАЗИЯ, ГИМАЛАИ, ТИБЕТСКОЕ ПЛАТО, ГРЕНЛАНДИЯ, СЕВЕРНАЯ АМЕРИКА

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
1 Обзор литературы по проблеме анализа динамики водной массы.....	7
2 Объекты исследования	12
2.1 Евразия.....	12
2.2 Горная система Гималаи и Тибетское плато.....	13
2.3 Гренландия.....	14
2.4 Северная Америка.....	14
3 Исходные данные для анализа климатических изменений	15
3.1 Гравиметрические данные GRACE.....	15
3.2 Индекс сухости SPEI	17
3.3 Метеорологические данные CRU TS 3.24.....	19
4 Результат анализа данных	20
4.1 Подготовка данных	20
4.2 Анализ АВЭМ для Евразии	23
4.3 Анализ АВЭМ для горной системы Гималаи и Тибетского плато.....	35
4.4 Анализ АВЭМ для Гренландии.....	43
4.5 Анализ АВЭМ для Северной Америки.....	46
Заключение	58
Список сокращений	60
Список использованных источников	61

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос изменение климата является глобальным. Миллионы и тысячи лет назад климат менялся под действием явлений планетарного масштаба: тектонических процессов, изменения орбиты и радиационного баланса Земли в целом. Столь же глобально сейчас и загрязнение атмосферы человеком — дополнительное воздействие, которое накладывается на естественные процессы. Понять причины изменений можно, только зная ситуацию на всей планете.

Средний глобальный уровень моря будет продолжать повышаться в XXI-м веке. Во всех сценариях [1] скорость повышения уровня моря, весьма вероятно, превысит значения, отмечавшиеся в 1971–2010 гг., вследствие повышения температуры океана и увеличения сокращения массы ледников и ледниковых покровов.

Существуют признаки того, что с середины XX века засухи усилились в некоторых регионах (например, в Средиземноморье) и ослабели в других (например, в центральной части Северной Америки). Наземных наблюдений до сих пор недостаточно, чтобы предоставить свидетельства изменений повторяемости засухи [1].

В условиях глобального потепления последних полутора столетий особое значение приобретает мониторинг водного баланса.

Цель: анализ динамики водной массы континентальной поверхности Земли на основе данных гравиметрической съемки GRACE.

Задачи:

- анализ аномалий водных эквивалентов массы на континентальной поверхности Земли (на примере Евразии и Северной Америки);
- связь АВЭМ с климатическими изменениями;
- анализ аномалий водных эквивалентов массы Гренландии, горной системы Гималаи и Тибетского плато.

1 Обзор литературы по проблеме анализа динамики водной массы

Проблема анализа динамики АВЭМ континентальной поверхности Земли является актуальной. Современные изменения климата, уже произошедшие и ожидаемые в XXI веке, несомненно оказывают и будут оказывать влияние на экстремальность климата, в том числе и на засухи.

В работе [2] авторы исследуют связь запасов продуктивной влаги в почве с полем силы тяжести Земли. Работа посвящена анализу возможности применения вариаций поля силы тяжести Земли, измеряемых спутниками GRACE для картирования продуктивной влаги в почве.

Измерения продуктивной влаги почвы выполнены на Караболыкском, Заречненском, Аркалыкском, Карасуйском тестовых полигонах Республики Казахстан на трех глубинах: 0,0–0,2 м; 0,2–0,5 м; 0,5–1,0 м. Проведен корреляционный анализ между значениями продуктивной влаги почвы (наземные данные) и толщины эффективного слоя влажности (ТЭСВ) по данным GRACE. В статье показано, что для слоя на глубинах 0,5–1,0 м наблюдается достоверная статистическая связь между продуктивной влагой почвы и ТЭСВ. Кроме того, отмечена надежная связь между ТЭСВ и толщиной снежного покрова. В заключении авторы пишут, что результаты измерений ТЭСВ, полученные спутниками GRACE в комплексе с наземными измерениями продуктивной влаги на тестовых полигонах, могут быть положены в основу регионального мониторинга продуктивной влажности почвы.

Загрязнение и очистка сточных вод - важный вопрос, влияющий на социальное развитие Китая. Там в последнее время замечен значительный прогресс в использовании GRACE для мониторинга динамики водного эквивалента. Об этом пишут авторы статьи [3].

В этом исследовании авторы используют данные GRACE, для мониторинга динамики водного эквивалента в Китае в период с марта 2003 по февраль 2013 г. Итог исследования показывает изменения наземных запасов воды в Китае за последнее десятилетие. Результаты были сопоставлены с

изменениями поверхностных вод и оценивались с использованием гидрологической модели GLDAS, а также местными данными, собранными Национальным метеорологическим центром.

По сравнению с традиционными методами полиномиальной аппроксимации, EOF декорелляция не искажает фактические геофизические сигналы Земли, а также не генерируют ложные сигналы [3]. Как таковой, он является более эффективным методом удаления коррелированные ошибки в GRACE месячной модели гравитации.

В статье [4] описывается изучение тенденции изменения силы тяжести с 2009 по 2013 год, полученные из наземных данных гравиметрии и GRACE в Северном Китае.

Авторы отмечают, что наземные данные показали различия в гравитации с запада на восток, а данные GRACE - различия с севера на юг. Основными причинами различия этих двух подходов могут быть способы наблюдения и пространственное разрешение данных GRACE. Данные GRACE указывают на снижение гравитации на юге и увеличение на севере. Процесс вертикальной деформации может быть основным фактором, влияющим на различия между результатами с севера и юга.

Недостаточно высокую надежность разделения различных составляющих водных ресурсов с помощью GRACE отмечают и авторы статьи [5].

Для оценки возможностей метода авторами проведено сопоставление данных современного годового стока рек Волга и Лена с результатами спутниковых измерений по технологии GRACE. Приведенные графики, рассчитанного и измеренного годового расхода рек, свидетельствуют о согласованном ходе кривых.

Так, для р. Волга общая среднеквадратическая невязка между приведенными величинами стока составляет всего $6,6 \text{ км}^3/\text{месяц}$, но при этом относительная точность метода GRACE (отношение среднеквадратической невязки к разнице максимума и минимума наземных гидрологических данных) составляет 21% [5].

Для того чтобы исследовать поведение водного эквивалента, авторы статьи [6] используют эмпирический подход для анализа и моделирования наблюдений с помощью GRACE.

Результаты показывают, что среди испытываемых параметров, температура, влагоудерживающая ёмкость почвы, и процент лесного покрова являются важными при анализе динамики, а площадь бассейна и средний уклон местности менее важны.

Полученные эмпирические соотношения были точны при моделировании временных рядов аномалий запасов воды глобального масштаба. Такой подход может быть применен в промежутке между заполнением текущих и будущих миссий GRACE и для прогнозирования систем хранения бассейновых данные предсказания будущих осадков.

Результаты авторов статьи показывают, что в более холодных бассейнах, температура вызывает декорреляцию или даже антикорреляцию осадков. В зимний период, изменчивость осадков выше и перераспределяется во времени в кумулятивный сезонный сигнал, а сила тяжести отражает этот эффект.

О количественном подходе к измерению гидрологической засухи на основе наблюдений за сохранением наземных вод с помощью GRACE пишут авторы статьи [7]. Измерения GRACE применяются путем расчета величины отклонения региональных ежемесячных аномалий водного эквивалента массы от ежемесячных климатических временных рядов, где отрицательные отклонения представляют собой дефицит водной массы. Ежемесячный дефицит количественно определяет объем воды, необходимый для возвращения в нормальные условия. Авторы объединяют дефицит эквивалента водной массы с продолжительностью события, чтобы рассчитать степень засухи. Базы данных засухи используются для определения событий метеорологической засухи в бассейнах рек Амазонки и Замбези и юго-восточных районах Соединенных Штатов и Техаса. Данный метод, пишут авторы статьи, четко определяет начало, конец и продолжительность гидрологической засухи, оценивает мгновенную

серьезность и максимальную величину засухи и хорошо сравнивается с базами данных метеорологической засухи.

В статье [8] авторы изучают масштаб и пространственное распределение ускорения изменения массы в Гренландии и ее статистическую значимость с использованием обработанных гравиметрических данных миссии GRACE на период 2002-2011 годов. Авторы отмечают значительное ускорение потерь водной массы в Канадском Арктическом архипелаге.

Для более точного анализа динамики АВЭМ континентальной поверхности Земли, совместно с данными GRACE используют и метеорологические данные CRU. Об этом пишут авторы статей [9, 10].

Входной информацией служит набор характеристик из глобальной базы данных по климату CRU TS 3.0, которая содержит средние месячные значения температуры и влажности воздуха, общей облачности, разности максимальной и минимальной температур воздуха, месячные суммы осадков, повторяемость числа дней с заморозками.

Ряды метеоданных в глобальной базе относится к периоду 1901–2006 гг., пространственный интервал между узлами регулярной сетки равен $0,5^\circ$ по долготе и широте, данные распределены по высотным уровням от 0 до 5734 м над уровнем моря [10].

На примере рек Амударьи и Сырдарьи авторы выполняют сравнительный анализ качества уравнений множественной линейной регрессии и делают вывод, что годовые величины осадков и температуры воздуха являются достаточно информативными переменными для получения линейных уравнений приемлемого вычислительного качества. Уравнения на основе данных из CRU TS 3.0 могут быть использованы вместе с другими аргументами для долгосрочных прогнозов годового стока Амударьи, Сырдарьи и Амударья + Сырдарья, когда будущие значения предикторов определяются из моделей циркуляции атмосферы [9].

Для агрометеорологических задач представляет интерес анализ индексов SPI и SPEI для выявления сезонных агрометеорологических засух в течение вегетационного периода. Об этом пишет автор статьи о засухах на Украине [11].

Индекс SPEI повышает надежность выявления засух в жарких районах с недостаточным и неустойчивым режимом увлажнения, что присуще степной и лесостепной зонам Украины. Индекс SPI целесообразнее использовать в северных районах, где температурный режим умеренный, а увлажненность, в среднем, выше. Оба показателя хорошо согласовываются по интенсивности в ярко выраженные, длительные засушливые периоды.

В статье [12] авторы провели анализ муссонных засух Индии с помощью индекса засухи, а именно SPEI.

Для расчета SPEI были использованы данные с высоким разрешением (1901-2010 гг.), ежемесячные данные с координатной привязкой температуры, а также наборы данных об осадках. Временные ряды показывают значительные годовые, десятилетние и долгосрочные тенденции.

Анализ показывает общее увеличение площади интенсивности засух и процент пострадавших от умеренной засухи в течение последних десятилетий. В частности, частота многолетних засух (24 месяцев) показал статистически значимое увеличение, что объясняется увеличением температуры воздуха на поверхности Земли и, таким образом, усыханию атмосферы.

2 Объекты исследования

Для анализа динамики АВЭМ были выбраны континенты Евразия и Северная Америка, остров Гренландия, горная система Гималаи и Тибетское плато.

Выбор данных объектов обусловлен изменением климата. Постоянные процессы таяния и уменьшение ледового покрова на острове Гренландия вызывают интерес не только у мировой общественности, но и у учёных [13, 14]. Крупнейший материк на Земле — Евразия, интересен тем, что большая его часть лежит в Северном полушарии (часть островов в Южном полушарии) пересекает все климатические пояса и климатические зоны. Такие особенности географического положения создают большие различия в нагревании северных и южных частей континента. Северная Америка, так же, как и Евразия, лежит во всех климатических поясах планеты, исключая экваториальный пояс. Засуха продолжает неуклонно усиливаться наряду с увеличением среднесуточных температур [15]. Горы и возвышенности обычно считают чувствительными индикаторами изменения климата. Тибетское нагорье является самым высоким плато в мире, и оказывает существенное влияние на региональную и глобальную циркуляцию атмосферы. Однако, эквивалент водной массы, объём речного стока и местная экология остаются плохо изученными.

2.1 Евразия

Площадь Евразии с островами - 53,4 млн. км² (острова занимают 2,75 млн. км²). Материк лежит целиком в северном полушарии. Для Евразии характерно распространение всех типов рельефа. Евразия расположена во всех климатических поясах северного полушария.

В зимний сезон Атлантический океан действует отепляюще на Европу. В прибрежных районах средняя температура января чуть выше 0°C. Далее к востоку морской воздух охлаждается, и температуры становятся отрицательными. На границе с Россией они уже – 5–10°C, а в Предуралье до –20°C. Количество осадков

убывает с запада на восток, что связано с ослаблением циклонической деятельности и трансформацией морского воздуха в континентальный [16].

В летний сезон в западном секторе, на побережье Атлантики прохладно — +14-17°C. Восточнее температура воздуха становится на 3-4°C выше. На побережье осадков выпадает меньше, чем зимой, вследствие ослабления циклонической деятельности. На европейской части России и Сибири июльские изотермы изменяются в широтном направлении от +5°C на крайнем севере, до +22-24°C на юге. Дождей выпадает летом больше, вследствие конвективных процессов. В восточном секторе нежарко, т.к. сюда поступает прохладный воздух с Тихого океана, очень влажно. Взаимодействие морского воздуха с континентальным приводит к образованию обильных фронтальных осадков ливневого характера. В южном азиатском секторе летом жарко и очень влажно. Обильным дождям способствует экваториальный муссон, идущий с Индийского океана, и рельеф. На наветренных склонах Гималаев выпадает до 12000 мм в год, это одно из самых дождливых мест на Земле. Во внутренних районах материка, включая Среднюю и Центральную Азию, жарко и сухо [16].

2.2 Горная система Гималаи и Тибетское плато

Значительная часть Тибета расположена на высотах 3-4 тыс. м над уровнем моря, высота гор достигает 5–7 тыс. м. Вершины высоких гор покрыты ледниками и снегом [17].

Климат Тибета резко отличается своей суровостью от соседних территорий, вследствие высоко приподнятого рельефа. Субтропический континентальный климат сухой, жаркий летом и относительно прохладный зимой. Осадков выпадает менее 200 мм в год, причем на западе области дожди в основном идут зимой, а на востоке – летом. Зимний характер осадков на западе связан с циклонической деятельностью Атлантики, а летний – на востоке связан с муссонной циркуляцией с Тихого океана. Средние температуры июля +28 - +30°C, а января – около 0°C [16].

2.3 Гренландия

Гренландия — самый большой остров в мире, принадлежит Дании. Его площадь равна 2 176 000 км² (в 10 раз меньше, чем Антарктида). Она омывается на западе проливами Девисовым и Смита, морем Баффина, бассейном Кейна и проливами Кеннеди, Нарес и Робсона; на севере — морями Северного Ледовитого океана, Линкольна и Ванделя; на востоке — Гренландским морем, мелководным Датским проливом, отделяющим Гренландию от Исландии; на юге — Лабрадорским морем и Атлантическим океаном.

Остров протянулся с юга на север более чем на 2500 км, наибольшая его ширина с запада на восток около 1200 км. Более 3/4 площади острова заняты ледником, покрывающим внутреннюю часть и выходящим во многих местах на побережье [18].

Гренландский ледяной щит — один из крупнейших современных резервуаров замороженной пресной воды. Объем льда в нем составляет примерно 2,85 млн. км³, и его полное таяние, согласно оценкам, вызовет подъем уровня Мирового океана примерно на 7 м [19].

2.4 Северная Америка

Третий по размерам материк на Земле — Северная Америка полностью лежит в северном и западном полушариях. Его площадь 24 млн. км². Крайними точками материка являются: северной — мыс Мёрчисон (на п-ве Бутия), западной — мыс Принца Уэльского (на п-ве Аляска), восточной — мыс Сент-Чарльз (на п-ве Лабрадор) и южной — мыс Марьято (п-ов Асуэро).

Северная Америка лежит во всех климатических поясах северного полушария, за исключением экваториального. Такие особенности географического положения создают большие различия в нагревании северных и южных частей материка.

На севере материка среднеянварская температура от -30°C до -20°C , и лишь на юге Аляски и западном побережье Канады – около нуля. На юге США зимой температуры положительные, в Центральной Америке до $+20^{\circ}\text{C}$. Наибольшее количество осадков выпадает зимой на Тихоокеанском и Атлантическом побережьях, а также на восточных склонах гор Центральной Америки. Большая часть Северной Америки получает летом обильные осадки. Исключение составляют Тихоокеанское побережье к югу от 40°C с. ш. и внутренние плоскогорья Кордильер, а также крайний север и арктические острова [16].

Летом большая часть материка сильно прогревается. Наиболее высокие температуры летом наблюдаются во внутренних районах материка, и особенно во впадинах, где средние температуры превышают $+30^{\circ}\text{C}$. В долине Смерти (Калифорния) была отмечена температура воздуха $+56,7^{\circ}\text{C}$. К северу материка летние температуры постепенно убывают, на берегу Северного Ледовитого океана около $+4^{\circ}\text{C}$ [16].

3 Исходные данные для анализа климатических изменений

3.1 Гравиметрические данные GRACE

Дистанционное зондирование со спутников стало ценным инструментом для мониторинга климата, так как оно предлагает большой охват площадей - от регионального до глобального.

В 2002 году, с запуском спутниковой миссии GRACE, впервые появилась возможность измерять временные изменения земного поля тяготения в региональном масштабе [20].

Два спутника GRACE находятся на расстоянии примерно 220 км друг от друга, причем при пролете над гравитационными аномалиями это расстояние изменяется, поскольку спутники сильнее или слабее притягиваются Землей.

Измеряемое между спутниками расстояние – исходная величина, содержащая информацию о гравитационном поле. Научные центры,

расположенные в Геофизическом институте (GFZ, Потсдам, Германия), в Центре космических исследований (CSR, Остин, США) и в Лаборатории реактивного движения (JPL, Пасадена, США) обрабатывают эти данные, принимая к учету показания GPS, акселерометров, звездных камер и др., и получают продукт 1-го уровня (L1). Затем с использованием сложного алгоритма решения обратной задачи с регуляризацией и внесением поправки на изменения атмосферного давления над сушей и океаном на величину твердотельного, океанского, полярного прилива и др., получают данные 2-го уровня (L2), представляющие собой разложение ежемесячного гравитационного поля по значениям коэффициентов Стокса на сфере со средним радиусом Земли. При вычитании среднего поля из ежемесячных значений коэффициентов Стокса, получаемых с GRACE, можно наблюдать изменения от месяца к месяцу с точностью до мкГал ($1 \text{ Гал} = 0,01 \text{ м/с}^2$). Ежемесячные файлы данных уровня L2 доступны на серверах GFZ, CSR и JPL [21].

Материалы съёмки представляют среднемесячные АВЭМ в сантиметрах. Точность расчетов находится в пределах 1,5-3 см и менее в зависимости от географической области, для которой осреднены данные. Основные проблемы связаны с учетом и устранением помех разного рода.

Период обращения спутников вокруг Земли составляет примерно 1 ч. 40 мин. Суточный период не обеспечивает достаточно густого покрытия всей поверхности Земли измерениями, поэтому выполняется накопление данных за 30-дневный период.

Для оценки динамики АВЭМ с сайта [22] в формате «.geotiff» были загружены данные GRACE.

В связи с тем, что при предобработке данных сигнал ослабевает, в результате использования фильтра Гаусса в 300 км, данные GRACE перемножены со Scale factor [22] для частичного восстановления сигнала. Операция «Умножить» выполнялась с помощью математических инструментов «Spatial Analyst» в ArcMAP 10.3 (рисунок 3.1.1).

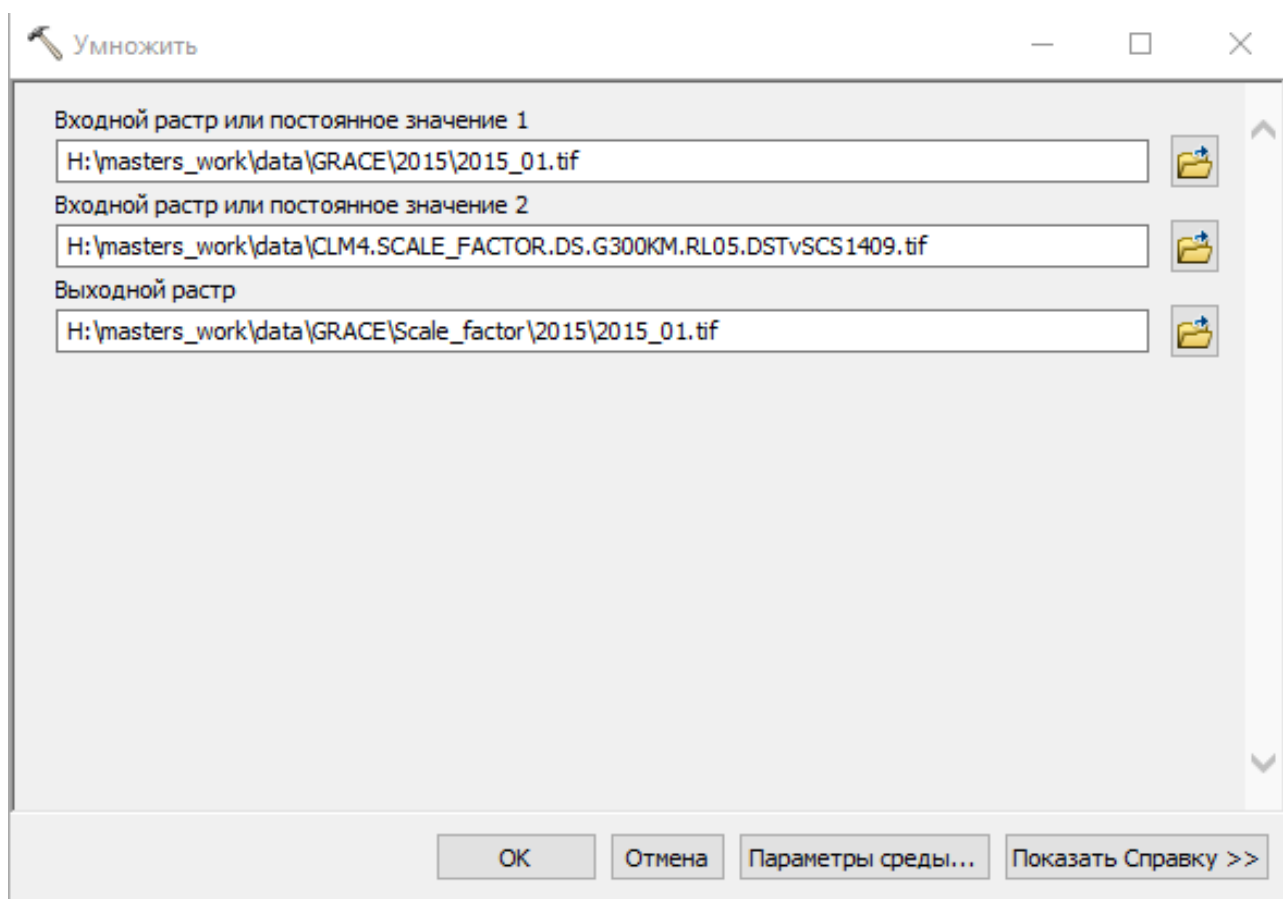


Рисунок 3.1.1 – Умножение слоёв в ArcMAP 10.3

В результате выполнения операции получается отфильтрованное фильтром Гаусса изображение.

3.2 Индекс сухости SPEI

Среди новых подходов, предназначенных для выявления климатических засух, можно выделить индекс SPEI. Индекс основан на расчете ежемесячных временных рядов осадков и средней температуры с учетом географических координат. Процедура определения величины индекса полностью повторяет процедуру расчета для индекса SPI, но дополнительно к величине осадков учитывается также и приземная температура [23].

Стандартизированный индекс осадков (SPI), рекомендованный ВМО для мониторинга засух (WMO, 2009), был предложен в работе McKee T.B. et al. в 1993 году и базируется на использовании временных рядов месячных сумм

осадков. Процедура расчета включает преобразование временных рядов осадков с применением гамма-распределения, а затем нормирование полученных вероятностей в стандартизированный индекс осадков согласно формуле (1):

$$SPI = F^{-1}G(R), \quad (1)$$

где G - интегральная функция гамма-распределения;

R - количество осадков;

F^{-1} - обратное нормированное гауссово распределение.

Предложенный стандартизированный индекс осадков — эвапотранспирации (SPEI) рассчитывается по процедуре, аналогичной расчету SPI. Однако вместо осадков для вычисления SPEI в формуле (2) используются разницы (D) месячных сумм осадков (R) и потенциальной эвапотранспирации (PET):

$$D_i = R_i - PET_i, \quad (2)$$

где i - порядковый номер расчетного месяца.

Данное выражение отражает в упрощенном виде схему водного баланса вертикального столба почвы от ее поверхности до глубины, где прекращается влагообмен.

С вероятностной точки зрения данный индекс аналогичен стандартизованному индексу осадков SPI. Однако вместо осадков для вычисления SPEI используется разность месячных сумм осадков и потенциальной эвапотранспирации. Эта особенность индекса может оказаться полезной при анализе происходящих изменений засушливости в условиях глобального потепления. Преимущество этого индекса не только в более детальном учете дефицита почвенной влаги, но и в том, что создан общедоступный банк данных SPEI с 1901 по текущий год на различных масштабах времени от 2 недель и до 48 месяцев с пространственным

разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$ географической сетки для всей планеты. Конкретные условия увлажнения и засушливости каждого индекса определяются по критериям, предложенным авторами индексов (таблица 1).

Таблица 1 — Критерии значений индекса SPEI

Значение SPEI	Оценка интенсивности
≥ 2	Экстремально влажно
$1,5 \div 1,99$	Сильно влажно
$1 \div 1,49$	Умеренно влажно
$0 \div 0,99$	Оптимальные условия
$-0,99 \div 0$	Слабая засуха
$-1,49 \div -1$	Умеренная засуха
$-1,99 \div -1,5$	Сильная засуха
≤ -2	Экстремальная засуха

С сайта [24] данные SPEI загружаются в формате «.nc». Загруженный файл содержит ежемесячные данные с 1950 года.

С помощью инструментов «Пространственная привязка» и «Проецировать» ArcToolbox с данными были проведены операции пространственной привязки и изменения проекции на WGS1984.

3.3 Метеорологические данные CRU TS 3.24

Архив CRU TS 3.24 разработан и поддерживается Тиндал центром в университете Восточной Англии, Великобритания. Он включает месячные данные для каждой климатической переменной в каждой ячейке сетки за период 1901 - 2015 гг. и охватывает территорию всех континентов земного шара с разрешением $0,5$ градусов по широте и долготы. Первичные переменные, такие как температура воздуха, количество осадков, суточная амплитуда температуры

воздуха, представленные в архиве основаны только на метеорологических наблюдениях.

Каждый массив среднемесячных данных представляет собой интерполяцию, основанную на наборе данных станций, имеющихся для данного момента времени. От месяца к месяцу меняется сеть имеющихся в распоряжении станций. Было решено использовать этот метод интерполяции, чтобы получить наилучшую оценку пространственной картины климата в каждый момент времени. Однако это в действительности означает, что долговременные изменения в данной ячейке сетки не будут обуславливаться исключительно подлинными изменениями климата, но также и изменениями сети станций. Влияние таких колебаний минимизировано путем интерполяции аномалий значений станции, а не абсолютных значений станций. Если сеть станций плотная, влияние наличия или отсутствия данных одной станции минимально. Однако, там, где сеть станции разрежена, эта особенность может существенно влиять на временной ряд в ячейке сетки [25].

Свободно распространяемые метеорологические данные CRU TS — CRU PRE (атмосферные осадки, мм в месяц) и CRU TMP (температура в градусах Цельсия) за 1901 - 2015 г. были загружены с официального сайта [26].

4 Результат анализа данных

4.1 Подготовка данных

Загруженные данные (SPEI, ABЭМ и метеорологические данные) были разделены на отдельные файлы (1 файл – 1 год – 12 каналов) для удобного использования в дальнейшем. С помощью шейп-файла из данных SPEI, ABЭМ и метеорологических данных CRU вырезаны объекты исследования.

Для построения карты корреляции данные приведены в соответствие с рисунком 4.1.1.

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
2015						0				0	0	
2014		0					0					0
2013			0					0	0			
2012					0					0		
2011	0					0						
2010												
2009												
2008												
2007												
2006												
2005												
2004												
2003						0						
2002	0	0	0			0	0					

Рисунок 4.1.1 – Соответствие данных об АВЭМ, атмосферных осадках, среднесуточной температуре и SPEI

На рисунке 4.1.1 нулями отмечены месяцы, когда данные об АВЭМ недоступны. Пустые ячейки означают, что все данные доступны. Для того чтобы корреляция посчиталась верно, из данных SPEI и метеорологических данных были удалены месяцы, отсутствующие в данных об АВЭМ.

Анализ временных рядов данных выполнялся с помощью модуля «PixelBasedTools» ArcMAP 10.3. Модуль предоставлен лабораторией мониторинга леса Институт леса В. Н Сукачева СО РАН. В результате работы инструментов данного модуля можно получить растровые изображения значений «slope» (наклон линии регрессии), «R raster» (корреляция), «P-value raster» (уровень значимости p), «Intercept» (смещение).

Статистическая значимость результата (P-value) - оцененная мера уверенности в «истинности» результата представляет собой вероятность ошибки, связанной с распространением наблюдаемого результата. Например, p-value = 0,05 показывает, что имеется 5% вероятность, что найденная в выборке связь между переменными является лишь случайной особенностью данной

выборки. $p = 0,05$ рассматривается как «приемлемая граница» уровня ошибки [27].

Классическим инструментом для измерения линейной зависимости между двумя наборами данных является коэффициент корреляции. Коэффициент корреляции — это числовая величина, находящаяся в интервале от -1 до $+1$. Чем она больше по модулю (т.е. ближе к $+1$ или -1), тем выше линейная связь между наборами данных. Знак коэффициента корреляции показывает, в одном ли направлении изменяются наборы данных. Если один из наборов возрастает, а второй убывает, то коэффициент корреляции отрицателен, а если оба набора одновременно возрастают или убывают, то коэффициент корреляции положителен. Значение коэффициента корреляции по модулю равное 1 соответствует точной линейной зависимости между двумя наборами данных [28].

Значение коэффициента корреляции, близкое к нулю, не означает независимости наборов данных. Коэффициент корреляции — это мера линейной зависимости, поэтому этот факт означает лишь отсутствие линейной зависимости, но не исключает любой другой.

Коэффициент детерминации (Slope) для модели с константой принимает значения от 0 до 1. Чем ближе значение коэффициента к 1, тем сильнее зависимость. При оценке регрессионных моделей это интерпретируется как соответствие модели данным. Для приемлемых моделей предполагается, что коэффициент детерминации должен быть хотя бы не меньше 50 %. Модели с коэффициентом детерминации выше 80 % можно признать достаточно хорошими (коэффициент корреляции превышает 90 %). Значение коэффициента детерминации 1 означает функциональную зависимость между переменными [29].

4.2 Анализ АВЭМ для Евразии

Подготовленные ряды данных были загружены в инструмент «LinearRegression» модуля «PixelBasedTools» в ArcMAP 10.3.

Результат работы модуля расчёта корреляции (слои PValue и R) для континента Евразия представлен на рисунках 4.2.1-4.2.6.

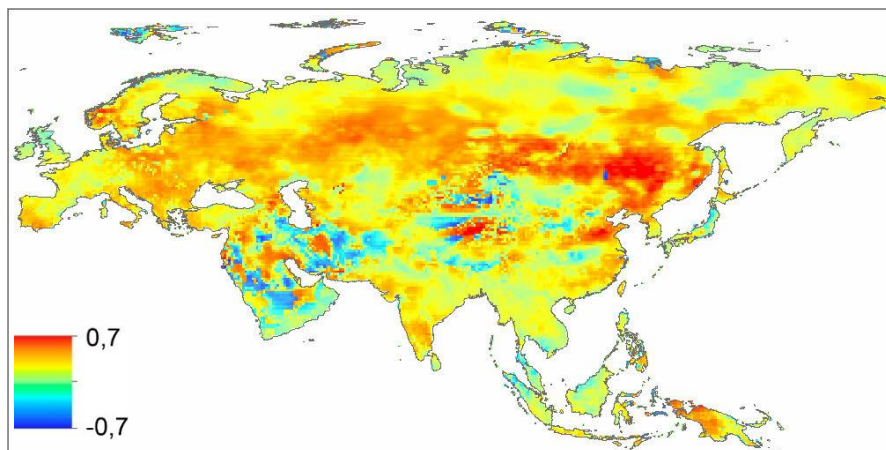


Рисунок 4.2.1 – Карта-схема корреляции индекса SPEI и данных об АВЭМ (2002-2015 гг.)

На карте-схеме (рисунок 4.2.1) синим цветом отмечены участки, на которых данные об АВЭМ и индекс SPEI коррелируются в большей степени. Для некоторых участков это означает, что чем больше АВЭМ, тем больше доступной водной массы для испарения.

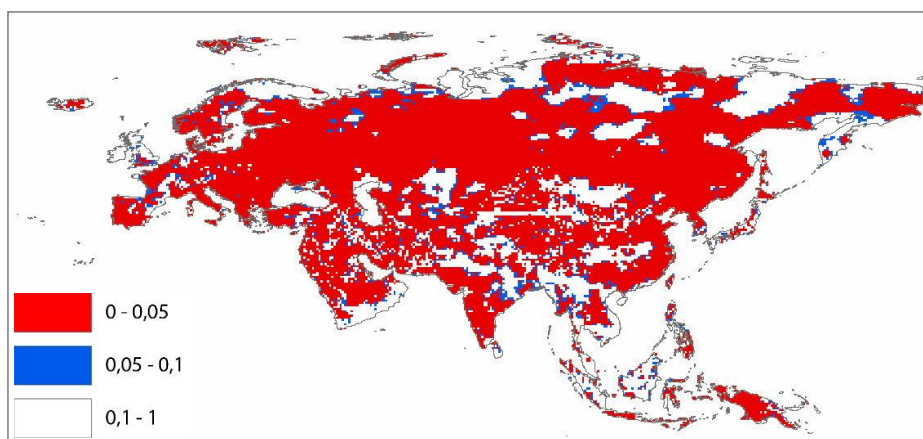


Рисунок 4.2.2 – Карта-схема значимости индекса SPEI и данных об АВЭМ (2002-2015 гг.)

На рисунке 4.2.2 красным цветом отмечены области со значением статистической значимости ≤ 0.05 . Обычно этот уровень является приемлемой границей статистической значимости. Согласно рисунку, корреляция индекса SPEI и данных об АВЭМ на большей части территории Евразии является статистически значимой.

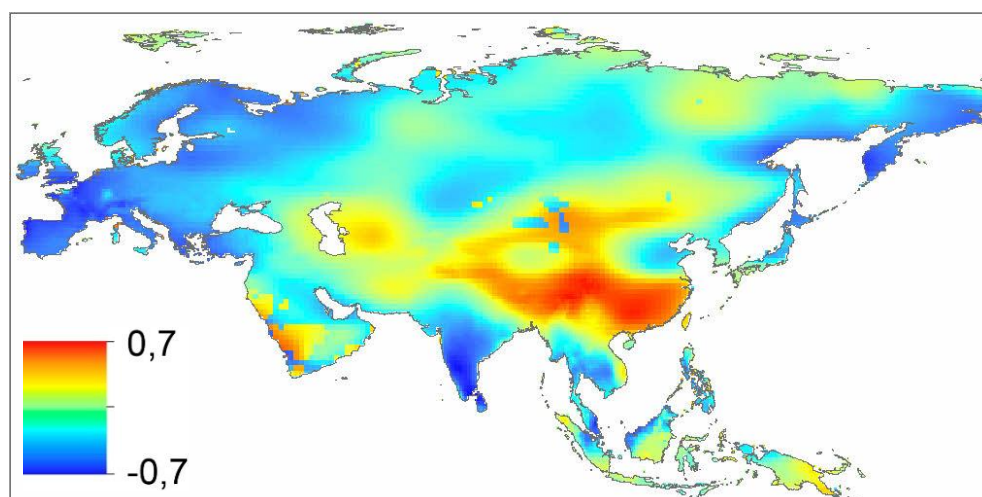


Рисунок 4.2.3 – Карта-схема корреляции данных о температуре и АВЭМ (2002-2015 гг.)

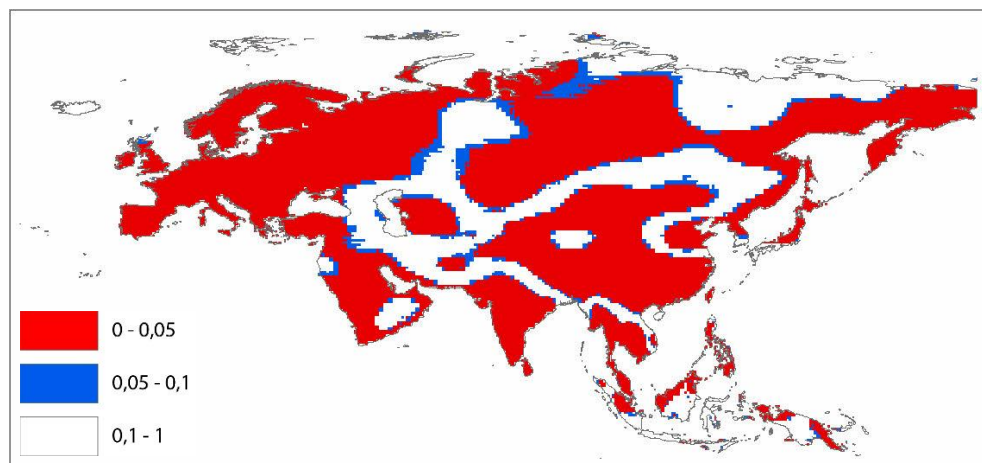


Рисунок 4.2.4 – Карта-схема значимости корреляции данных о температуре и АВЭМ (2002-2015 гг.)

На рисунке 4.2.3 представлена карта-схема корреляции данных о температуре и АВЭМ. Согласно рисунку 4.2.4 данная корреляция значима на

большей территории Евразии. Это означает, что чем больше температура, тем больше АВЭМ испаряется, тает и утекает по системе речной сети.

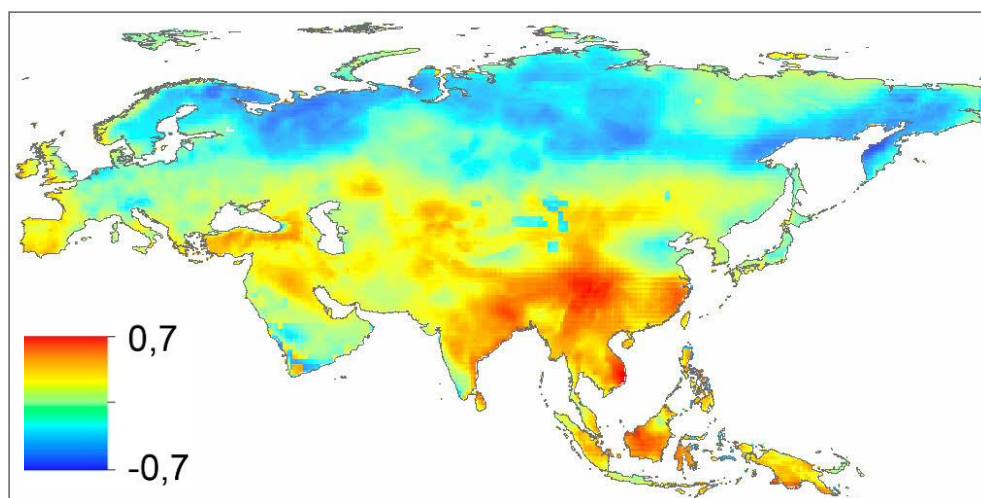


Рисунок 4.2.5 – Карта-схема корреляции данных об атмосферных осадках и АВЭМ (2002-2015 гг.)

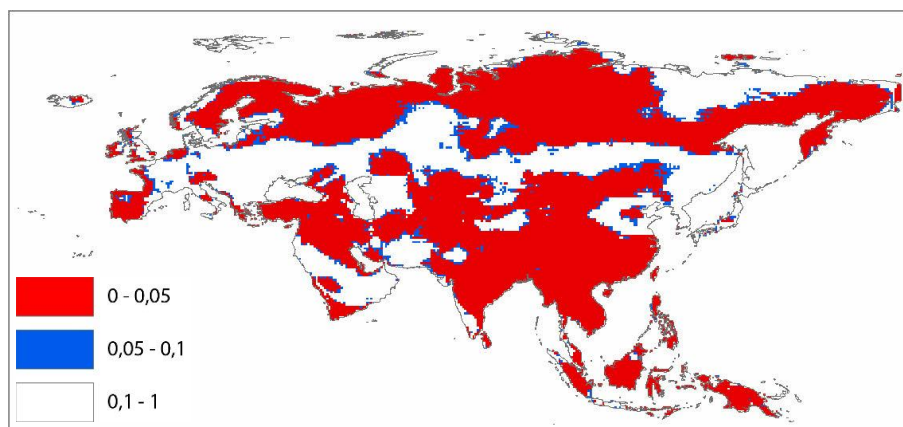


Рисунок 4.2.6 – Карта-схема значимости корреляции данных об атмосферных осадках и АВЭМ (2002-2015 гг.)

На рисунках 4.2.5-4.2.6 видно, что Евразия поделена на 3 зоны: северная, для которой нет достоверной связи данных об атмосферных осадках и АВЭМ; прерывистая переходная зона; Китай, Индия, Таиланд, Вьетнам, Мьянма, где наблюдается положительная связь данных об осадках и АВЭМ. Если имеется зависимость, это означает, что чем больше дождя было на данной территории, тем больше АВЭМ накопилось.

Для построения трендов (Slope) подготовлен набор данных с абсолютно всеми данными (данные SPEI и метеорологические данные не приводились в соответствие с АВЭМ).

Результат построения трендов и их значимости для континента Евразия представлен на рисунках 4.2.7-4.2.14.

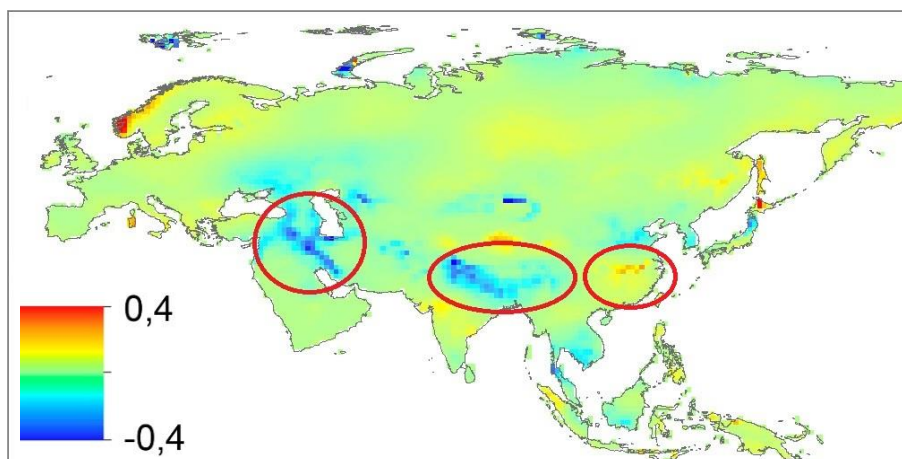


Рисунок 4.2.7 – Карта-схема трендов АВЭМ (2002-2015 гг.)

По рисунку 4.2.7 можно отметить, что на большей территории Евразии установился возрастающий тренд. На рисунке 4.2.8 отмечены статистически значимые изменения трендов АВЭМ.

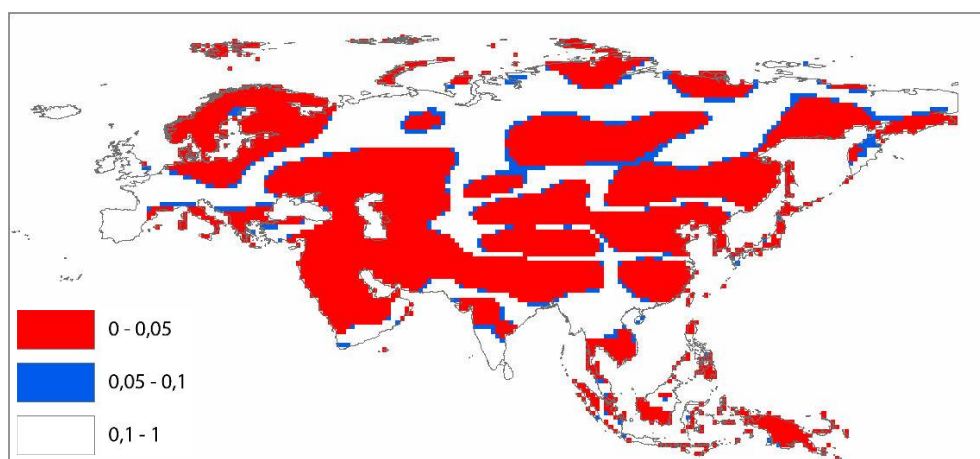


Рисунок 4.2.8 – Карта-схема значимости трендов АВЭМ (2002-2015 гг.)

Результат, представленный на рисунке 4.2.7, согласуется с отчётом IPCC 2013 г. [1].

На рисунке 4.2.9 представлена карта наблюдений изменений приземной температуры за 1901-2012 года из отчёта [1]. На территории Евразии с 1901 года наблюдается увеличение приземной температуры на $0.4-2.5^{\circ}\text{C}$, что соответствует данным об уменьшении АВЭМ. На отмеченных участках (рисунок 4.2.7) наблюдается возрастающий тренд АВЭМ обуславливается таянием ледников.

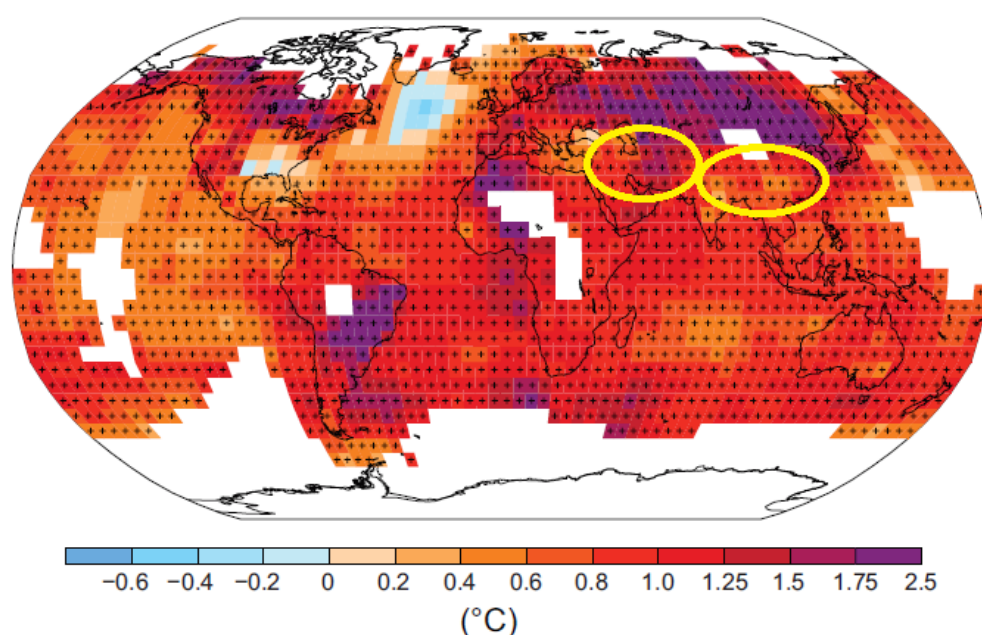


Рисунок 4.2.9 – Наблюдение изменений приземной температуры воздуха по (HadCRUT4, 1901-2012)

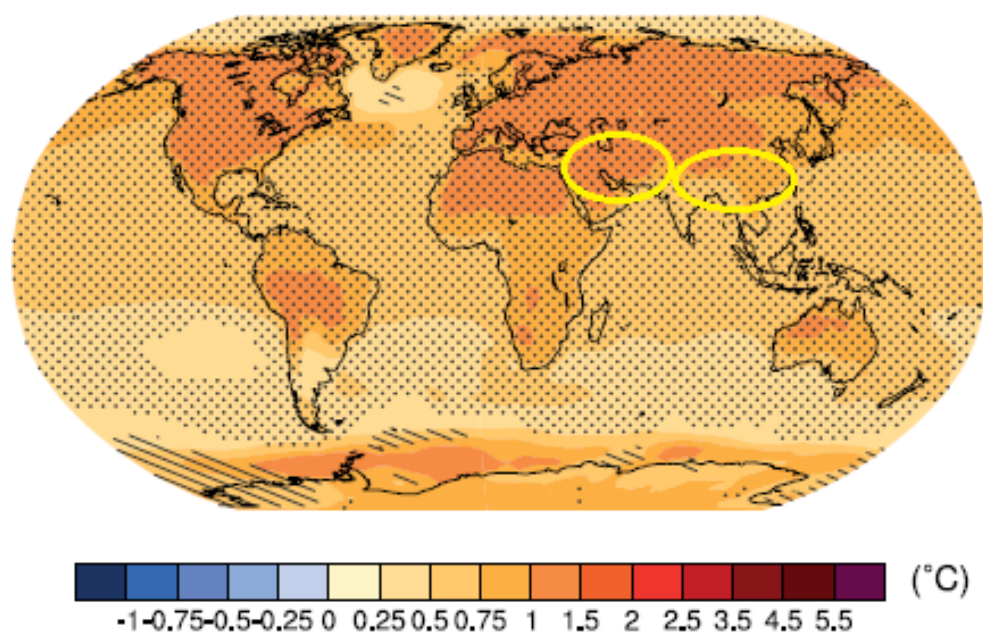


Рисунок 4.2.10 – Прогноз изменений приземной температуры воздуха (RCP4.5: 2016-2035)

По прогнозам [1] (рисунок 4.2.10), в 2016-2035 гг. тренд на увеличение температуры на исследуемой области сохраняется. Вместе с увеличением температуры увеличивается испарение и уменьшается АВЭМ.

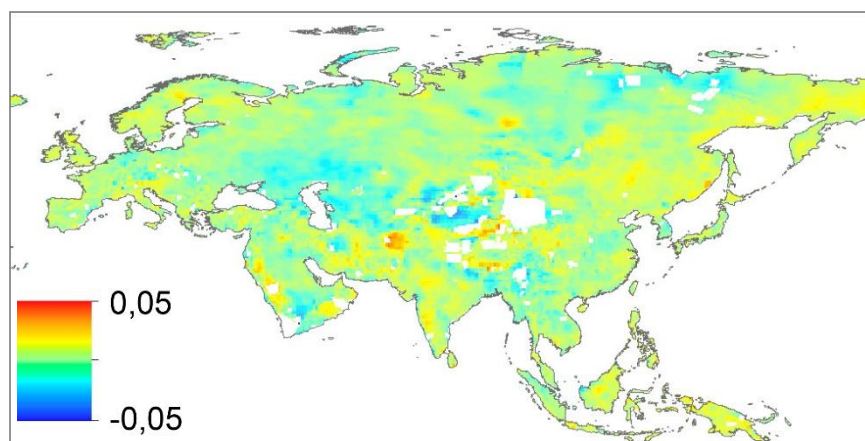


Рисунок 4.2.11 – Карта-схема трендов SPEI (2002-2015 гг.)

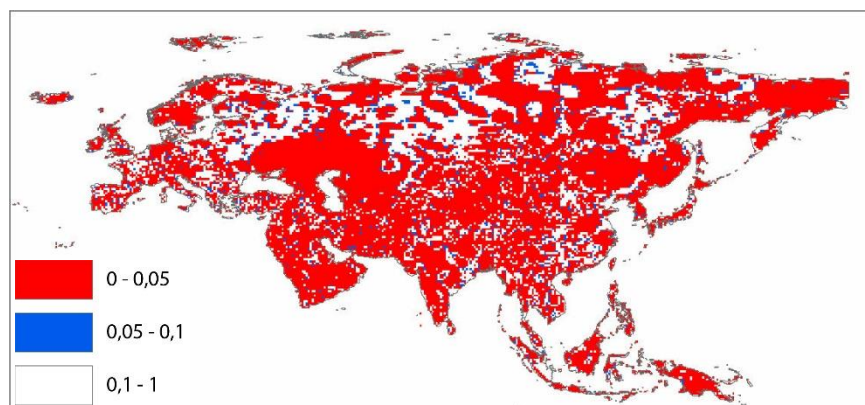


Рисунок 4.2.12 – Карта-схема значимости трендов SPEI (2002-2015 гг.)

Согласно рисункам 4.2.11 и 4.2.12 на большей части территории Евразии происходят значимые изменения трендов, однако эти тренды небольшие и локальные.

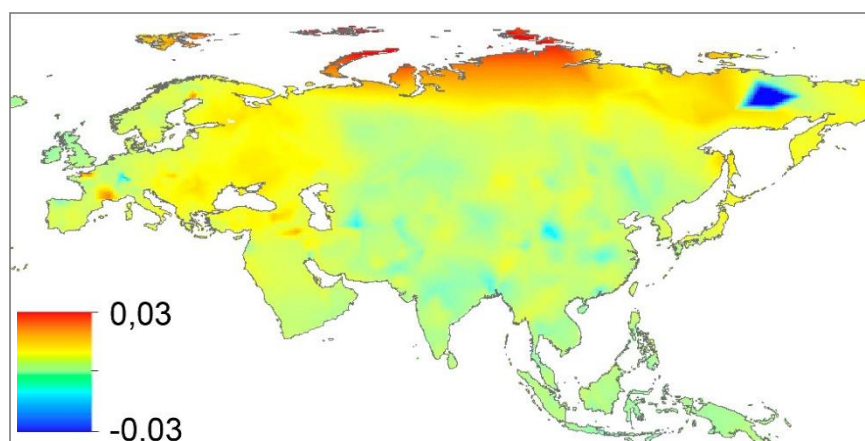


Рисунок 4.2.13 – Карта-схема трендов температуры (2002-2015 гг.)

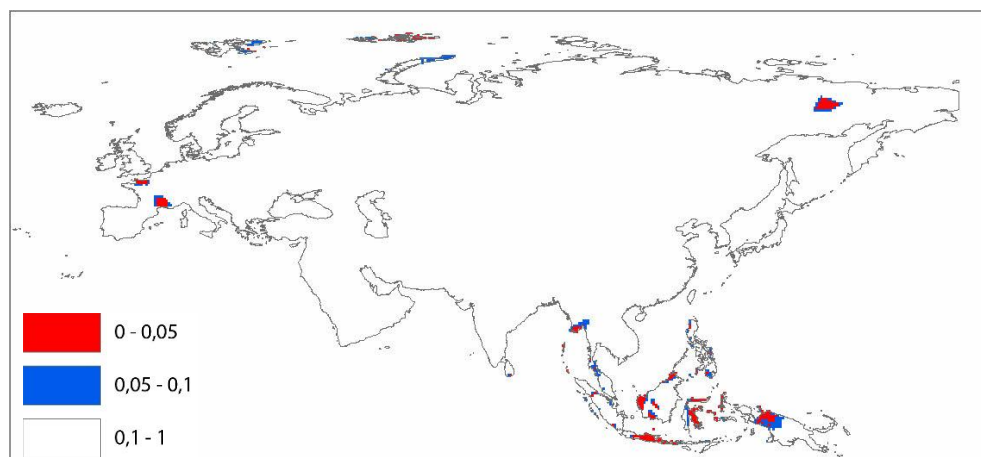


Рисунок 4.2.14 – Карта-схема значимости трендов температуры (2002-2015 гг.)

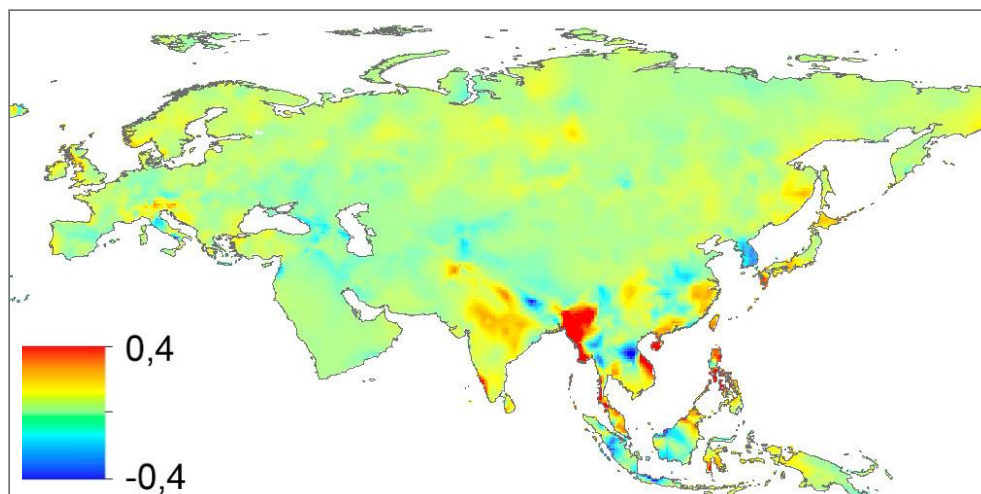


Рисунок 4.2.15 – Карта-схема трендов атмосферных осадков (2002-2015 гг.)

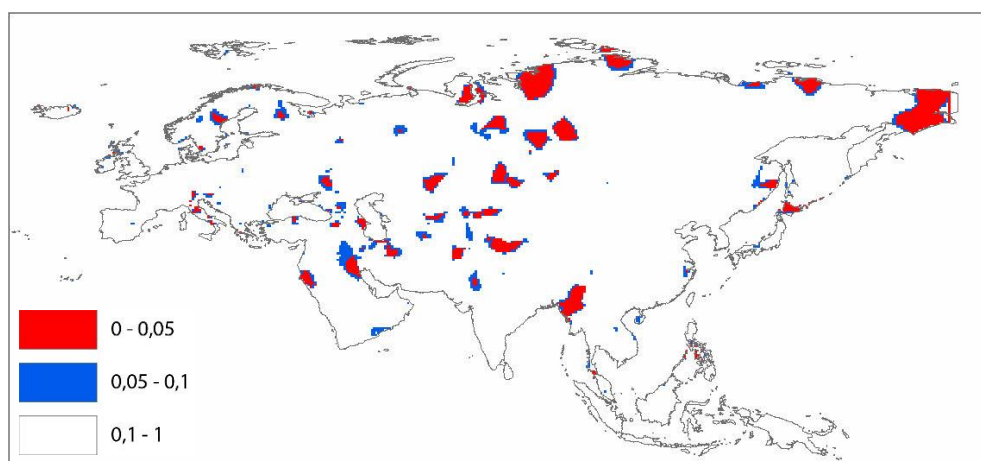


Рисунок 4.2.16 – Карта-схема значимости трендов атмосферных осадков (2002-2015 гг.)

На рисунках 4.2.13 и 4.2.15 — тренды температуры и атмосферных осадков. Согласно рисункам 4.2.14 и 4.2.16 тренды незначимые, поэтому для дальнейшего анализа данные не подходят.

С помощью инструмента «Статистика набора каналов» вычислена и извлечена статистика для набора данных АВЭМ, которая необходима для построения и анализа графика динамики. Минимальные значения АВЭМ влияют на разные климатические параметры и объекты — древостои, водный баланс, состояния рек и озёр в регионах и т.д. АВЭМ в Евразии принимает минимальные

значения с июня по октябрь в 2004, 2009, 2012, 2013 и 2015 годах (рисунок 4.2.17).

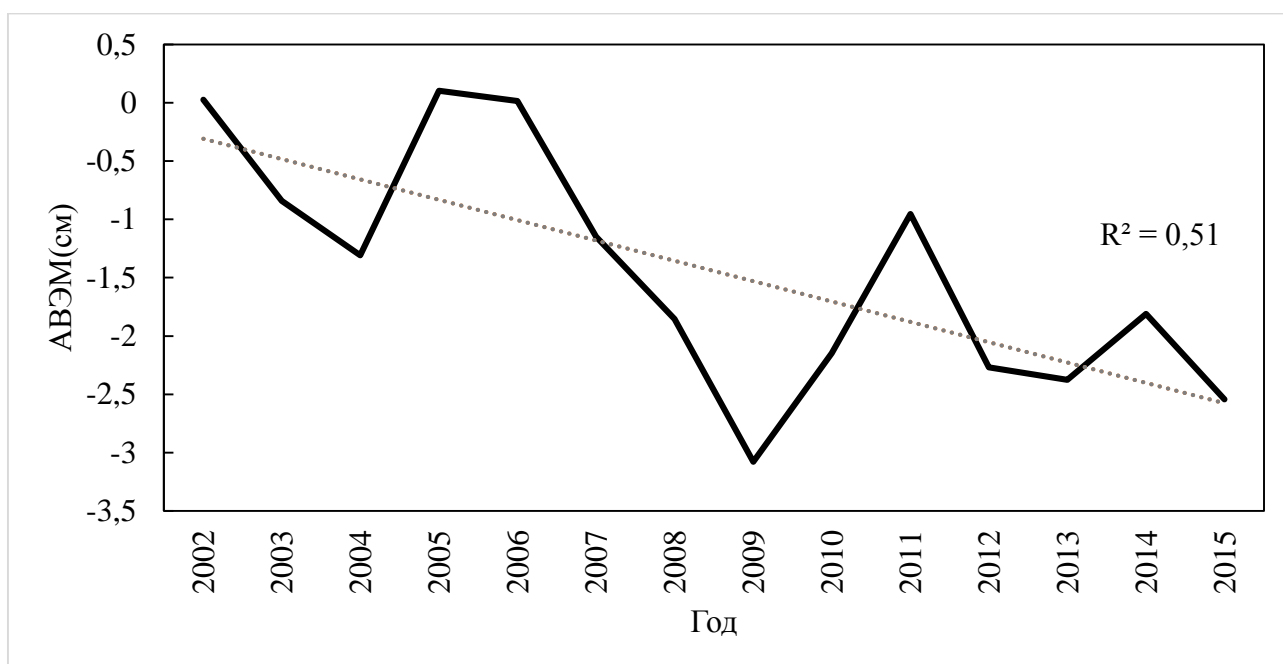


Рисунок 4.2.17 – График минимумов АВЭМ за июнь-октябрь 2002-2015 гг.

С помощью программного обеспечения STATISTICA 12.0 была вычислена значимость тренда P (0,004) и величина коэффициента детерминации R^2 (0,51). Согласно этим данным, изменения тренда являются статистически достоверными.

Используя инструмент «Calculate Integral Negative» построена модель (рисунок 4.2.18), которая вычисляет суммарные минимумы согласно графику. Это даёт возможность посмотреть суммарный вклад минимальных годов и выделить территории, на которой он повлиял.

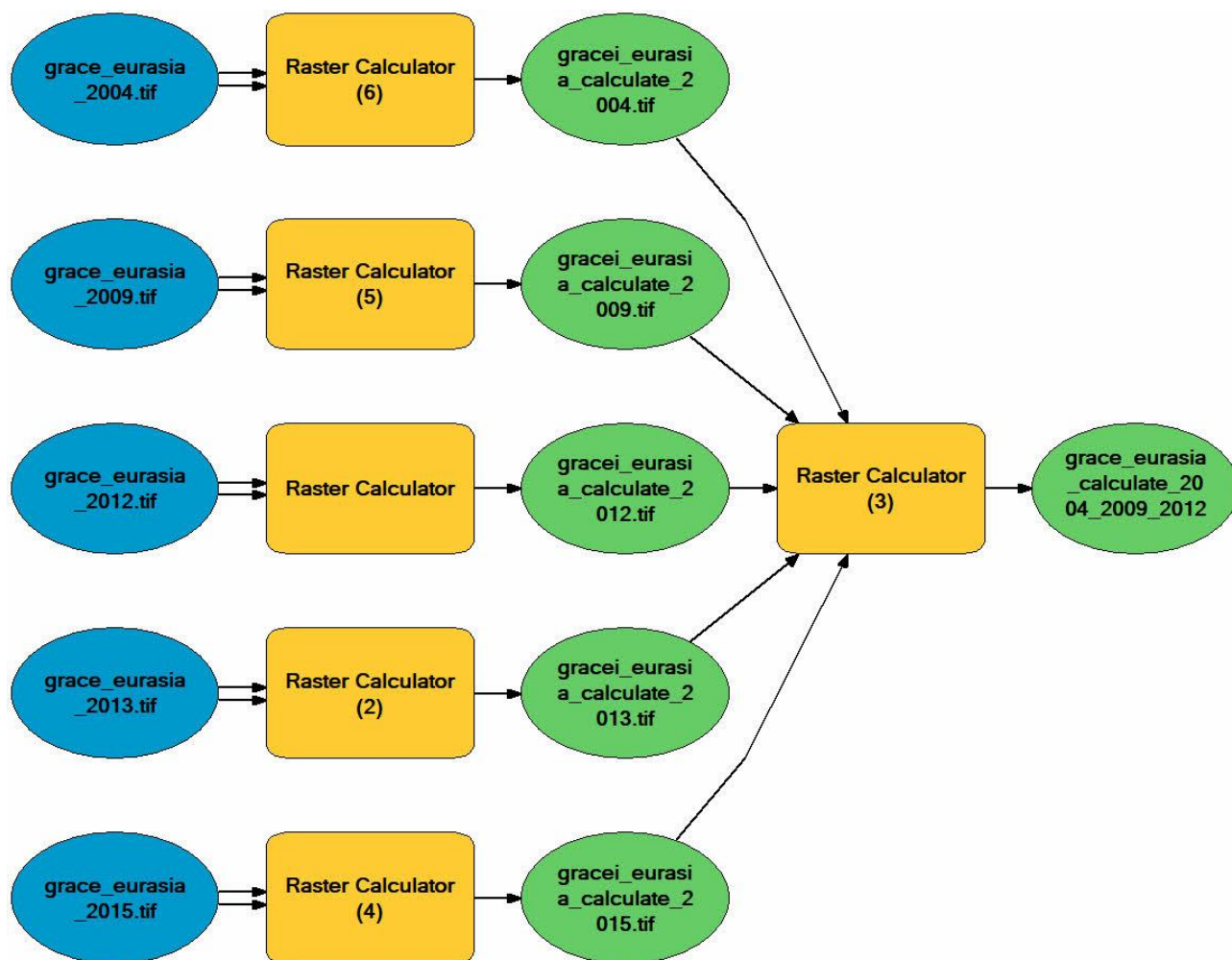


Рисунок 4.2.18 – Инструмент «Calculate Integral Negative». Модель для Евразии

На входе в модель – 5 файлов с данными за период июнь-октябрь 2004, 2009, 2012, 2013 и 2015 гг. Звенья «Raster Calculator» содержат выражения, состоящие из заданных входных данных, значений, операторов и инструментов алгебры карт. На выходе – файл, содержащий данные по суммарным минимумам (рисунок 4.2.19).

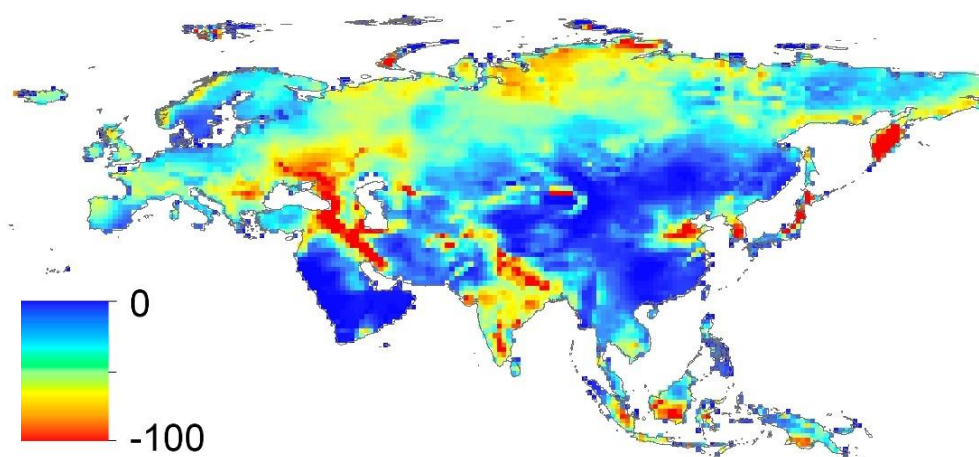


Рисунок 4.2.19 – Карта-схема суммарных минимумов АВЭМ

Результаты, представленные на рисунке 4.2.19 согласуются с трендом АВЭМ (рисунок 4.2.7).

Методика обработки данных об АВЭМ, температуре, атмосферных осадках и индексе SPEI дала результаты близкие к опубликованным в научной литературе.

Так, данные об возрастающем тренде температуры практически на всей российской территории и в целом для России уверенно указывают на продолжающееся потепление [30].

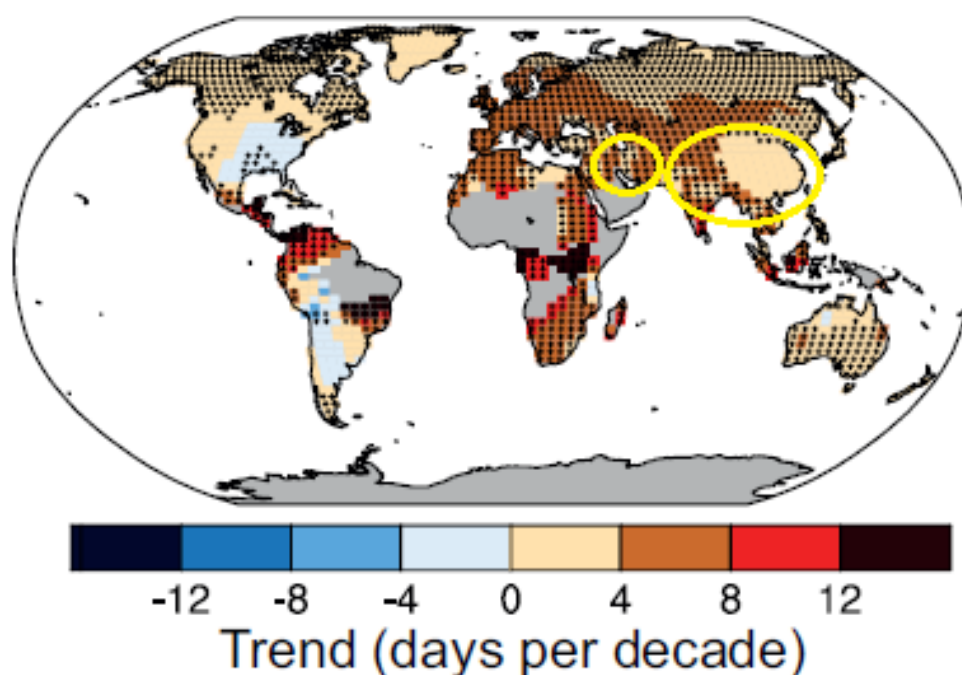


Рисунок 4.2.20 – Тренд количества тёплых дней (1951-2010)

Согласно отчёту [1] (рисунок 4.2.20), количество тёплых дней на исследуемой территории увеличилось на 4-8 дней в декаду.

В отчёте [1] авторы прогнозируют увеличение количества осадков на большей части исследуемой территории на 0-10% (рисунок 4.2.21) и уменьшение на 0-10% на европейской части.

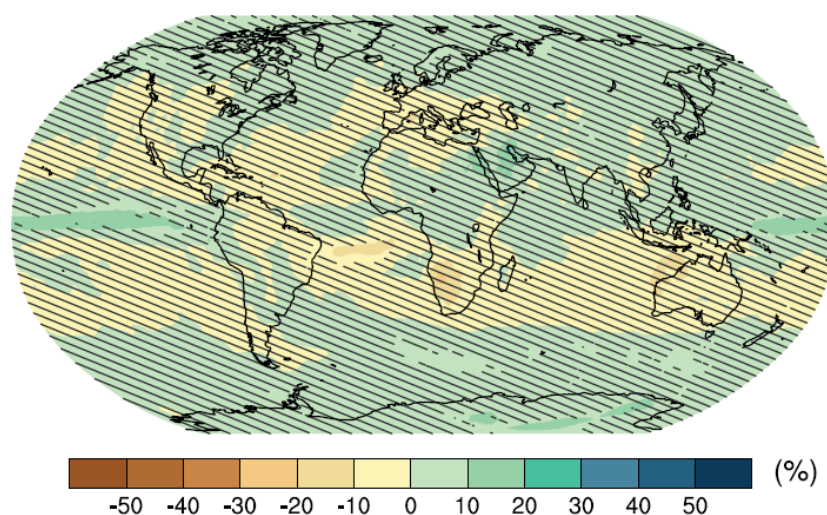


Рисунок 4.2.21 – Прогноз изменения осадков (%) (CMIP5, 2016-2035)

Согласно прогнозам [1] (рисунок 4.2.22) в некоторых районах влажность увеличится на 1-4%. В европейской части континента отмечается уменьшение на 1-2%.

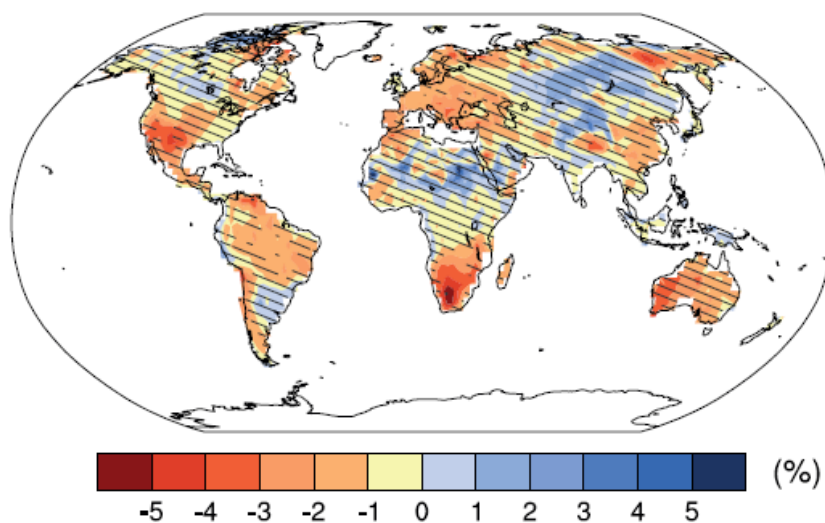


Рисунок 4.2.22 – Прогноз изменения влажности почвы (%) (CMIP5, 2016-2035)

На территории СНГ продолжается потепление. Линейный тренд среднегодовой температуры за 1976-2014 гг. для территории СНГ в целом составляет $+0.41^{\circ}\text{C}/10$ лет, т.е. в два с половиной раза выше, чем скорость роста глобальной температуры и на треть выше скорости роста температуры по суше Северные полушария [31].

В докладе [32] сообщается, что аномалии летних осадков относительно 1995-2014 гг. отрицательны во всех земледельческих регионах России, что также согласуется с результатами данной работы.

4.3 Анализ АВЭМ для горной системы Гималаи и Тибетского плато

Для построения трендов подготовлен набор данных с абсолютно всеми данными (данные SPEI и метеорологические данные не приводились в соответствие с АВЭМ).

Результат построения трендов и их значимости представлен на рисунках 4.3.1-4.3.7.

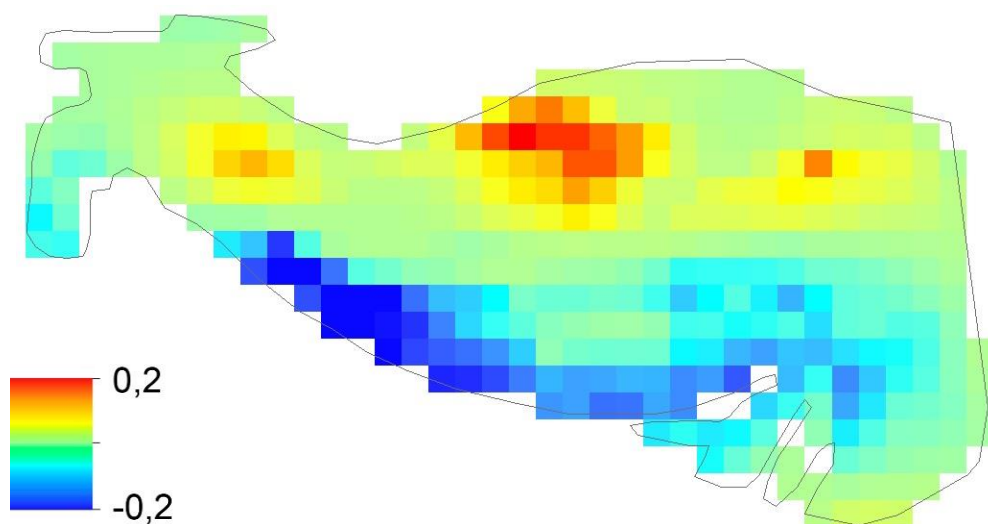


Рисунок 4.3.1 – Карта-схема трендов АВЭМ (2002-2015 гг.)

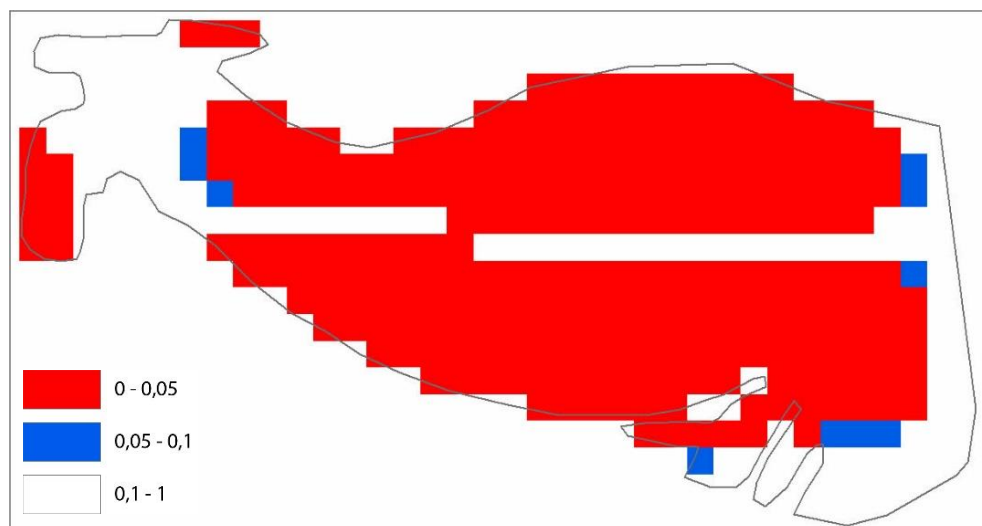


Рисунок 4.3.2 – Карта-схема значимости трендов АВЭМ (2002-2015 гг.)

Согласно рисункам 4.3.1 и 4.3.2 на территории Тибетского плато отмечается статистически значимый возрастающий тренд АВЭМ. На рисунке 4.3.2 видно, что исследуемый объект делится на 2 части, что согласуется с ЦМР SRTM (рисунок 4.3.3).

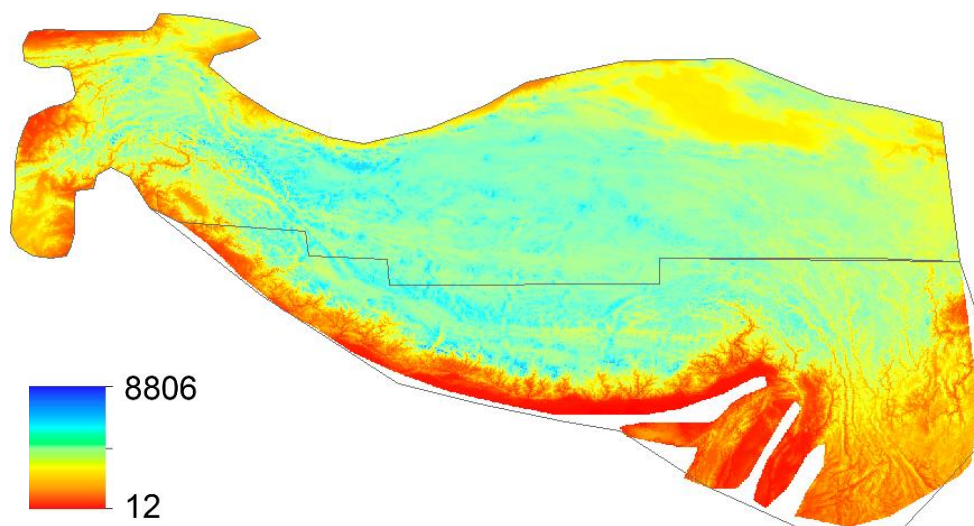


Рисунок 4.3.3 – ЦМР SRTM (м)

Для северной и южной частей исследуемого объекта с помощью инструмента «Статистика набора каналов» вычислена статистика для набора данных АВЭМ (рисунок 4.3.4).

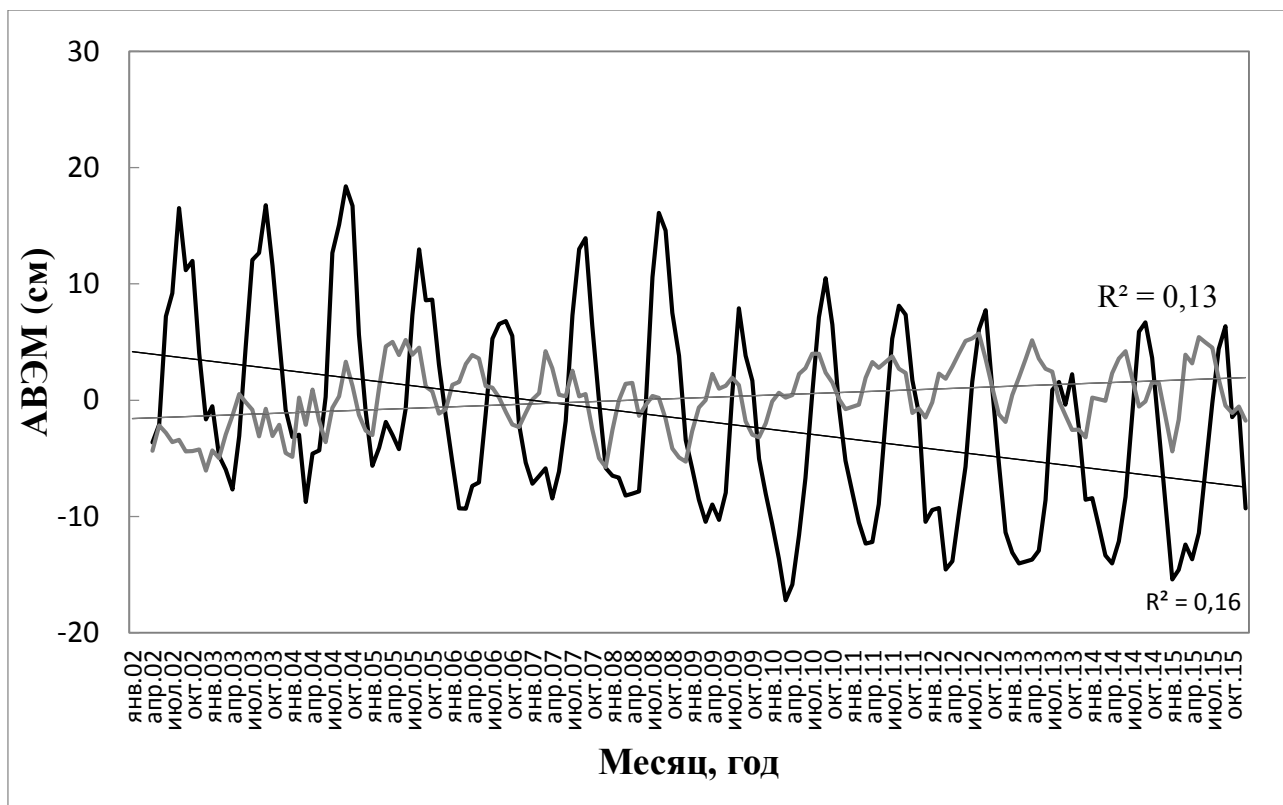


Рисунок 4.3.4 – График АВЭМ и тренды для горной части (чёрный) и плато (серый) (2002-2015 гг.)

Согласно графику (рисунок 4.3.4), на территории плато отмечается возрастающий тренд, в горной среде – убывающий. Увеличение АВЭМ в области плато связан с таянием льдов в горной: доступная водная масса тает и утекает по системе речной сети.

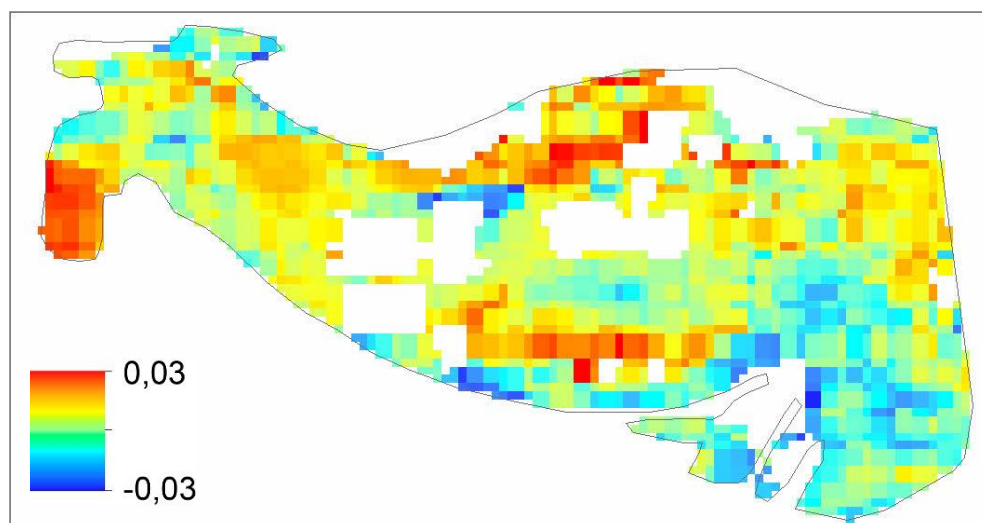


Рисунок 4.3.5 – Карта-схема трендов SPEI (2002-2015 гг.)

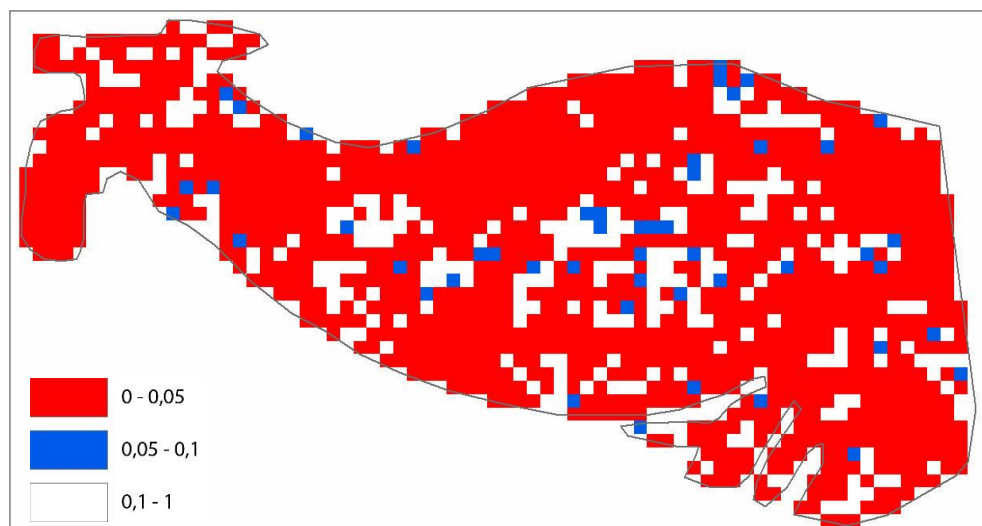


Рисунок 4.3.6 – Карта-схема значимости трендов SPEI (2002-2015 гг.)

На рисунке 4.3.6 отображена карта-схема значимости трендов SPEI, согласно которой на большей части исследуемой территории наблюдаются значимые изменения трендов SPEI.

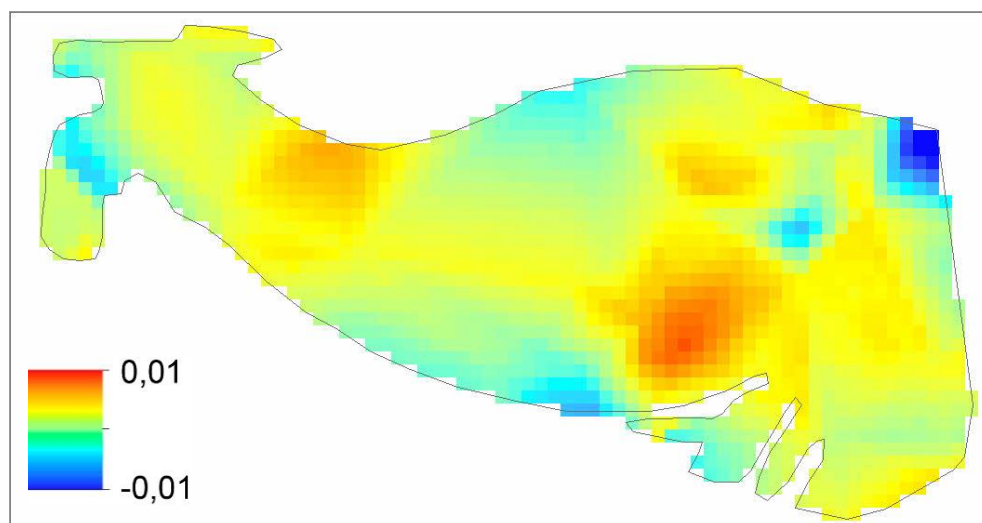


Рисунок 4.3.7 – Карта-схема трендов среднесуточной температуры (2002-2015 гг.)

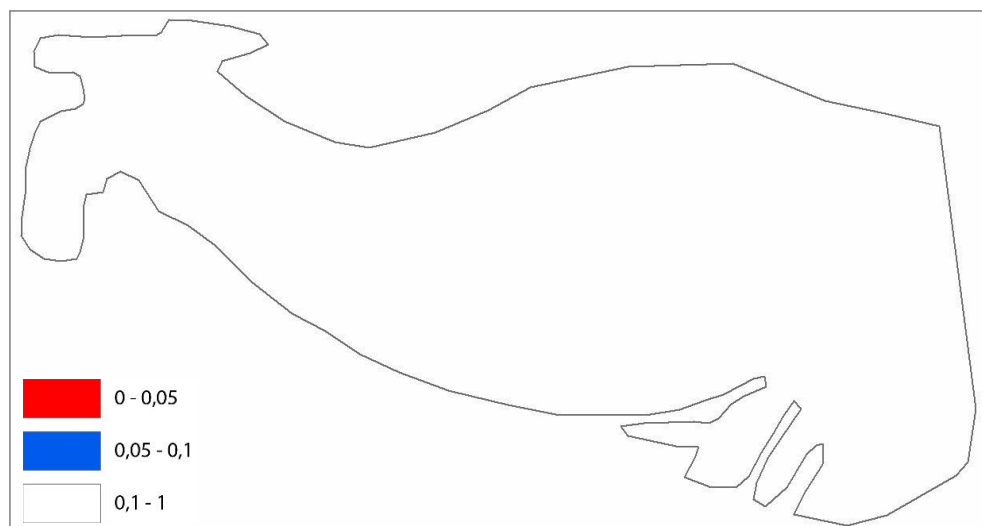


Рисунок 4.3.8 – Карта-схема значимости трендов среднесуточной температуры (2002-2015 гг.)

На рисунках 4.3.7 и 4.3.8 незначимые изменения трендов среднесуточной температуры.

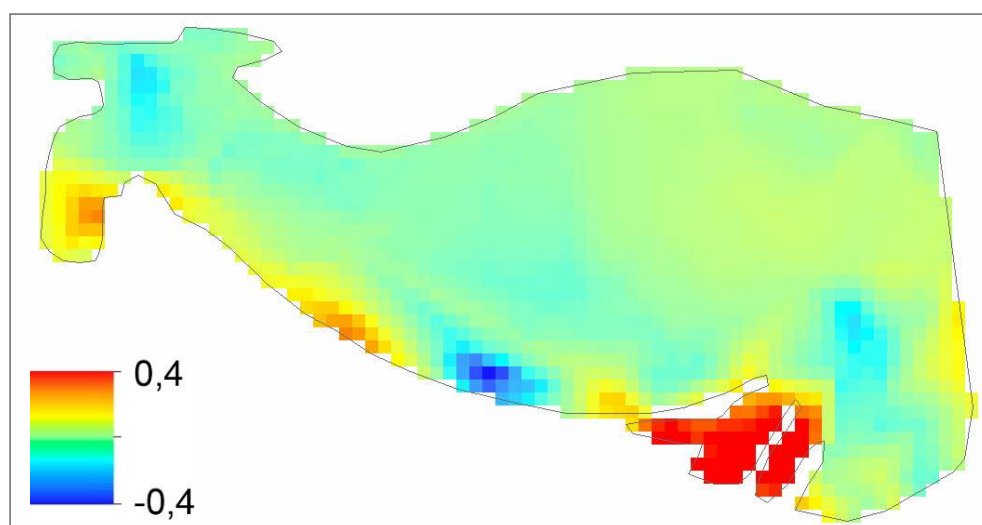


Рисунок 4.3.9 – Карта-схема трендов атмосферных осадков (2002-2015 гг.)

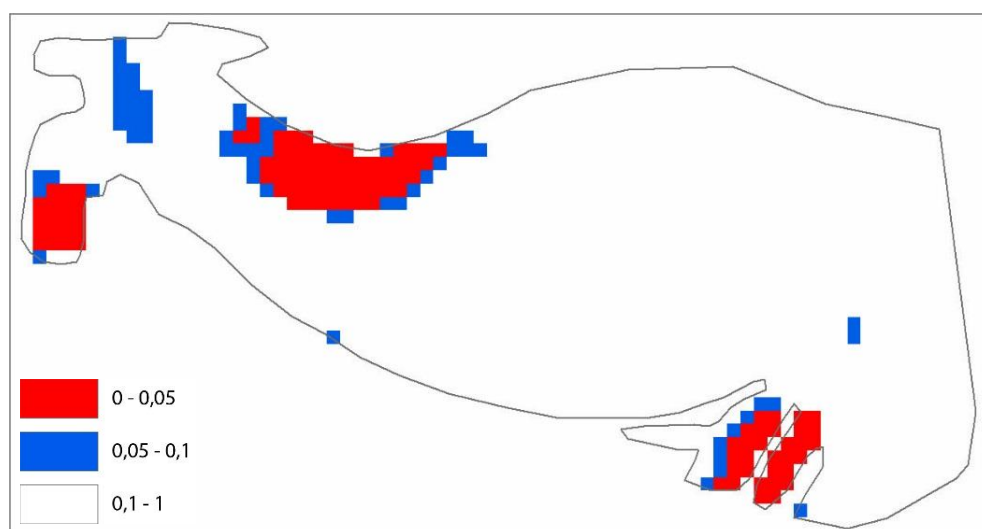


Рисунок 4.3.10 – Карта-схема значимости трендов атмосферных осадков (2002-2015 гг.)

Карта-схема значимости трендов (рисунок 4.3.10) показывает, что на большей части исследуемой территории установился незначимый тренд атмосферных осадков (рисунок 4.3.9), поэтому данные не могут быть использованы для дальнейшего анализа.

Для горной системы Гималаи и Тибетского плато вычислена статистика для набора каналов. Минимальные значения водный эквивалент массы принимает с июня по октябрь в 2004, 2009 и 2013 годах (рисунок 4.3.11). Данные по минимумам отображены на рисунке 4.3.13.

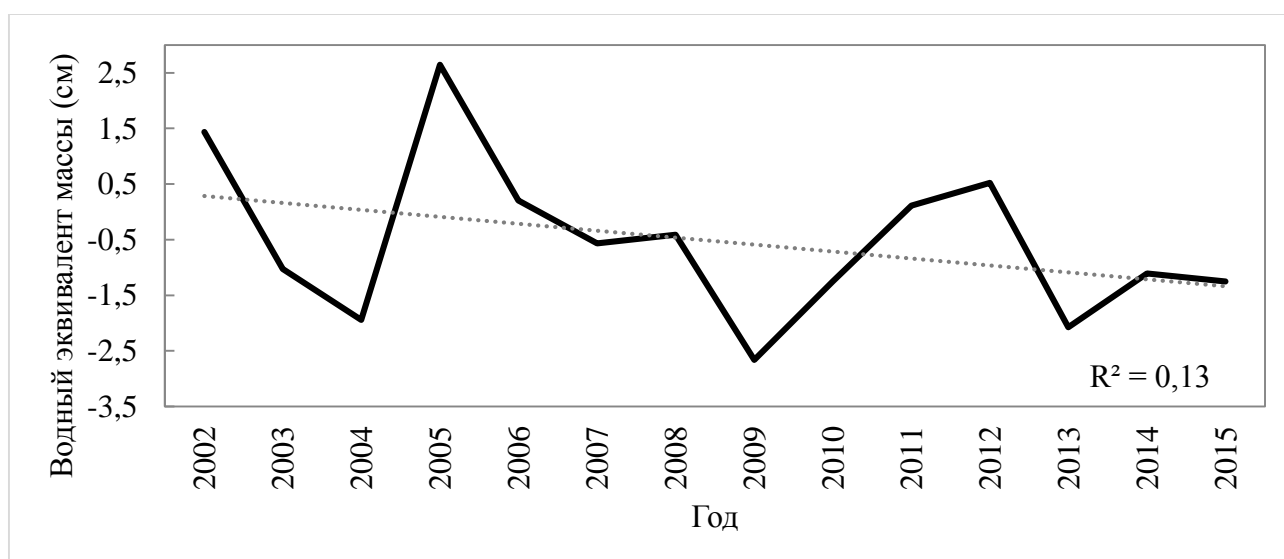


Рисунок 4.3.11 – График минимумов АВЭМ за июнь-октябрь 2002-2015 гг.

С помощью программного обеспечения STATISTICA 12.0 была вычислена значимость тренда P (0,370290) и величина коэффициента детерминации R^2 (0,10). Согласно этим данным, изменения тренда являются статистически недостоверными.

Согласно рисунку 4.3.3 извлечена статистика минимумов по высотному составу.

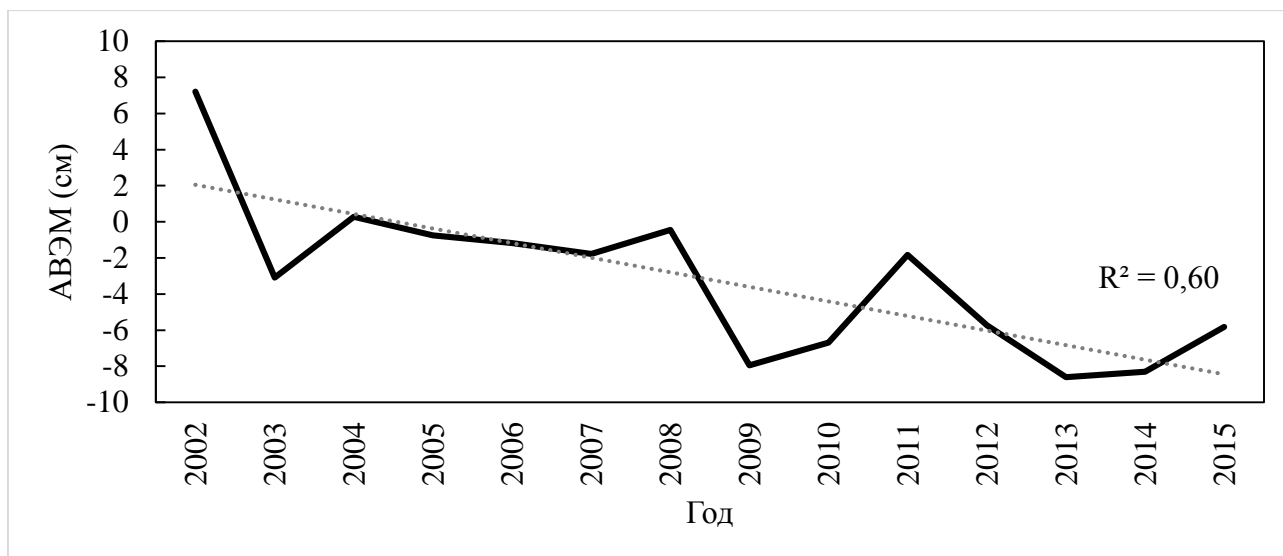


Рисунок 4.3.12 - График минимумов АВЭМ за июнь-октябрь 2002-2015 гг.
(горная система)

На рисунке 4.3.12 значимость тренда P (0,001) и величина коэффициента детерминации R^2 (0,60). Согласно этим данным, изменения тренда являются статистически достоверными.



Рисунок 4.3.13 - График минимумов АВЭМ за июнь-октябрь 2002-2015 гг.
(Тибетское плато)

На рисунке 4.3.13 значимость тренда P (0.08) и величина коэффициента детерминации R^2 (0.23). Согласно этим данным, изменения тренда являются статистически недостоверными.

С помощью инструмента «Статистика по ячейкам» получены данные о минимумах АВЭМ. С помощью инструмента «CalculateIntegralNegative» построена модель (рисунок 4.3.12), которая вычисляет суммарные минимумы.

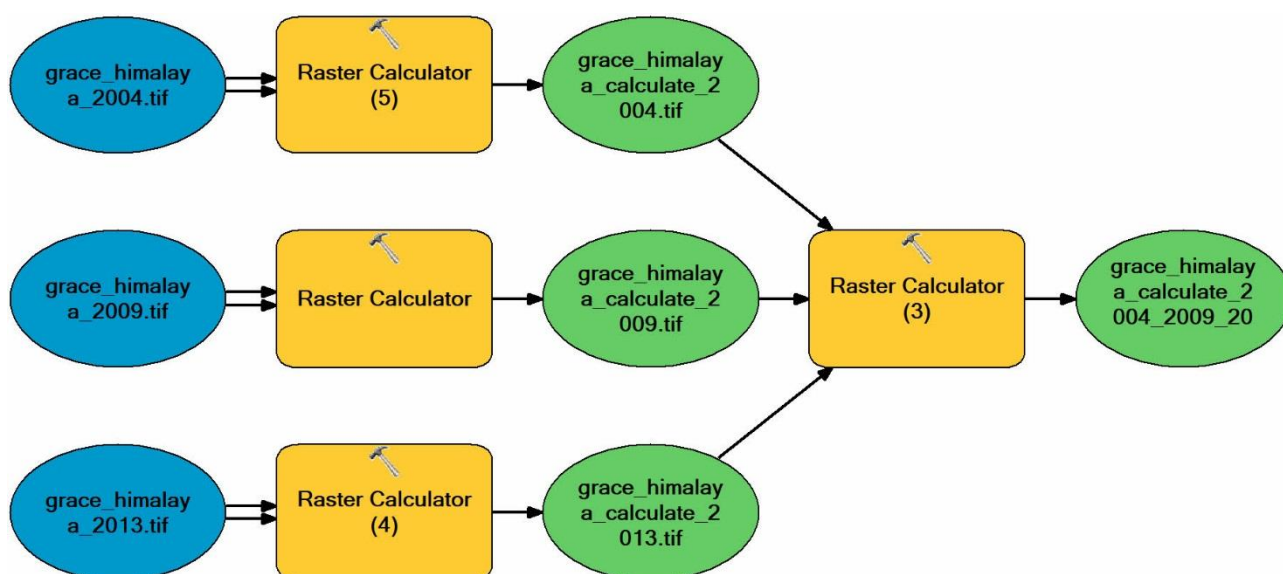


Рисунок 4.3.12 – Инструмент «Calculate Integral Negative». Модель для горной системы Гималаи и Тибетского плато

На входе в модель – 3 файла с данными за период июнь-октябрь 2004, 2009, 2013 гг. Звенья «Raster Calculator» содержат выражения, состоящие из заданных входных данных, значений, операторов и инструментов алгебры карт. На выходе – файл, содержащий данные по суммарным минимумам (рисунок 4.3.13).

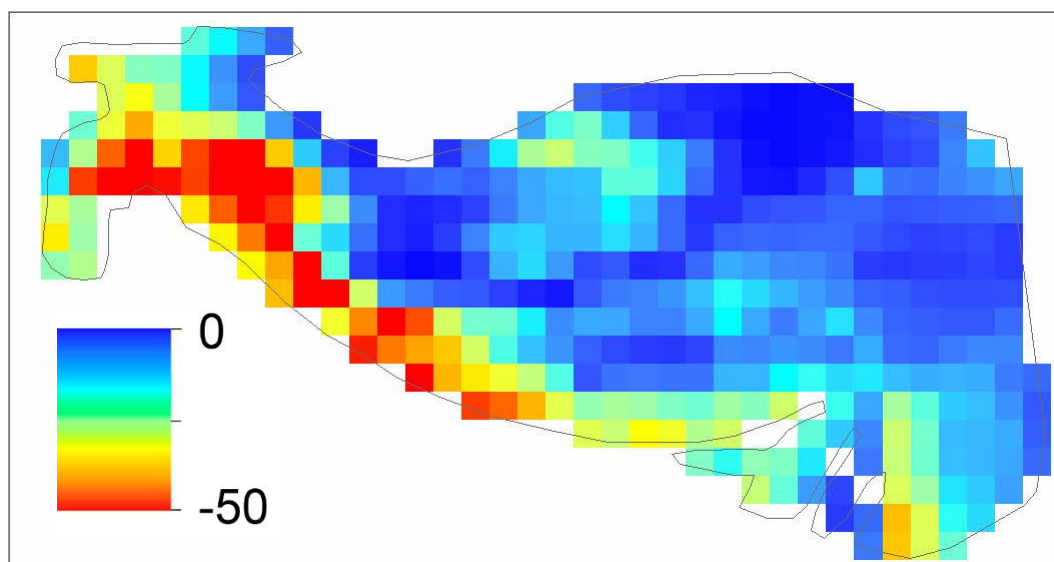


Рисунок 4.3.13 – Карта-схема суммарных минимумов АВЭМ. Горная система Гималаи и Тибетское плато

Об убывающем тренде АВЭМ в горной системе Гималаи пишут и авторы [33]. Таяние снега и ледников приводит уменьшению АВЭМ в горах и увеличению на Тибетском плато.

Температура воздуха на поверхности Тибетского нагорья увеличивается более быстрыми темпами, чем в Северном полушарии в целом [34, 35]. Тибетское нагорье в целом становится более теплым и влажным в течение последних десятилетий. Количество осадков понемногу увеличивается, но увеличение не столь выраженное, как и температура.

4.4 Анализ АВЭМ для Гренландии

Результат работы построения карт-схем трендов для острова Гренландия представлен на рисунках 4.4.1-4.4.6.

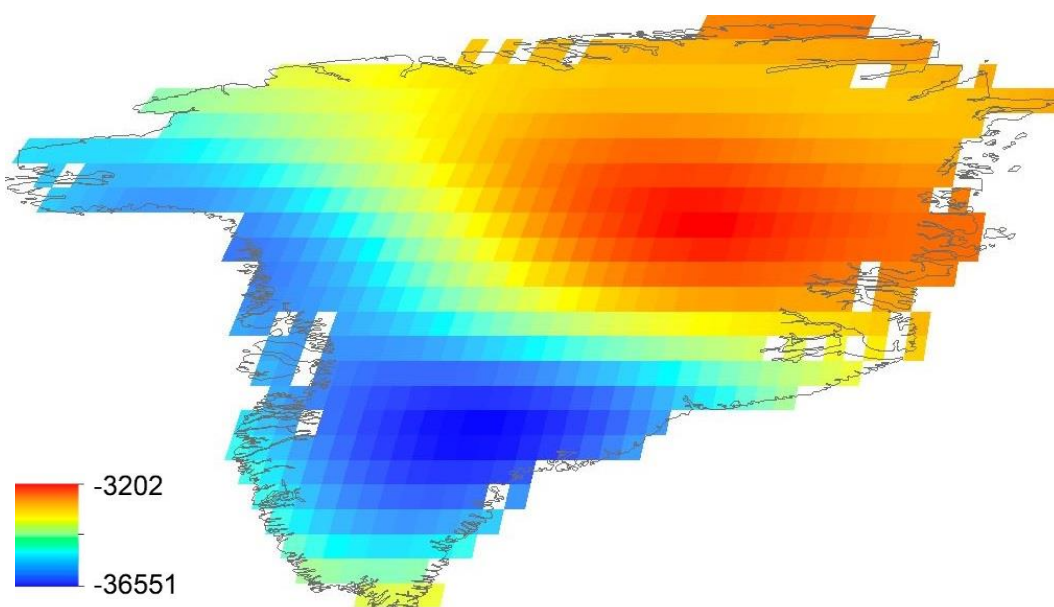


Рисунок 4.4.1 – Карта-схема трендов АВЭМ (2002-2015 гг.)

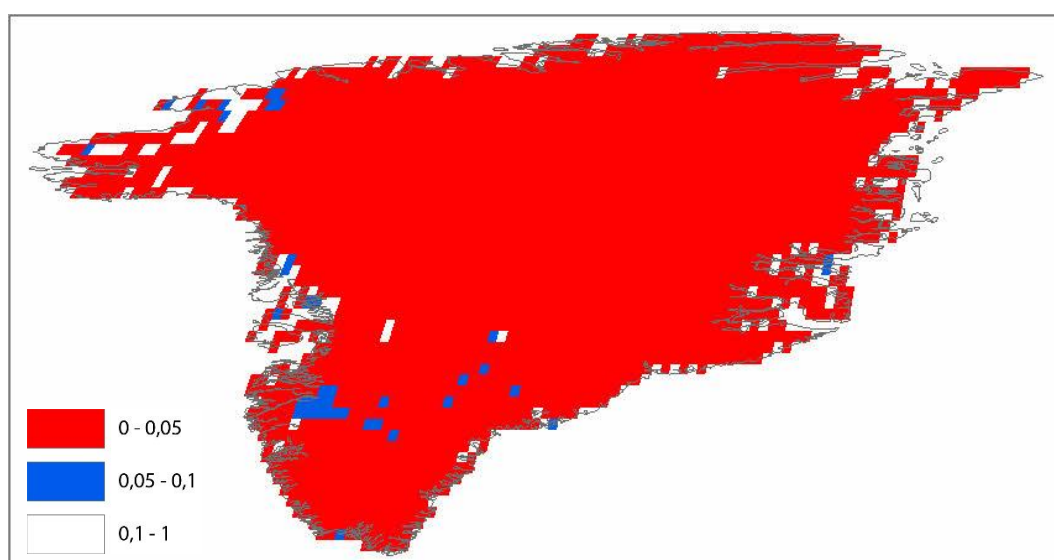


Рисунок 4.4.2 – Карта-схема значимости трендов АВЭМ (2002-2015 гг.)

Согласно рисунку 4.4.1, в целом на острове установился значимый убывающий тренд. Но в отличие от статьи [38], где отмечались 2 точки экстремумы убывания АВЭМ, замечена только 1 точка.

С помощью инструмента «Статистика набора каналов» вычислена статистика для набора данных АВЭМ (рисунок 4.4.3). На графике отмечается убывающий тренд.

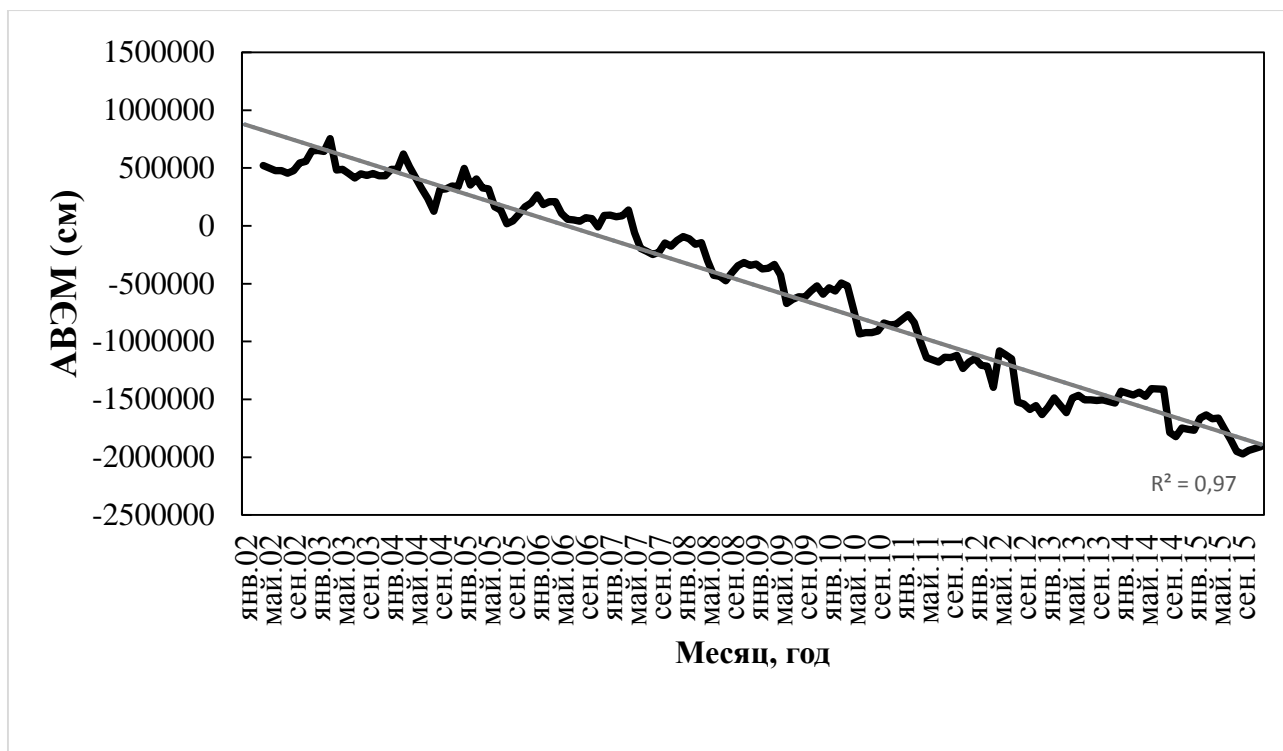


Рисунок 4.4.3 – График АВЭМ за 2002-2015 гг.

В связи с тем, что данные SPEI недоступны для Гренландии, а тренды осадков и температуры являются незначимыми в данной работе они не приводятся.

Авторами [19] отмечается, что на большей части Гренландии имеет место возрастающий тренд приземной температуры.

Карта-схема трендов АВЭМ показывает тренд на потерю морского льда на юго-западной части материка, что согласуется с докладом [1]. Средняя скорость сокращения массы льда Гренландского ледникового покрова, весьма вероятно, значительно увеличилась с 34 гигатонн/год за период 1992–2001 гг. до 215 гигатонн/год за период 2002–2011 гг [1].

Снижение АВЭМ наблюдается по всей площади ледника, где в южной его части по данным GRACE в пересчете на плотность льда скорость дегляциации достигает ~ -13 см/год, что не противоречит другим результатам, полученным в краевых частях ледника (Climate Change..., 2007) [36].

Авторы [37] оценили изменения массы всей Гренландии, происходившие с апреля 2002 года по апрель 2006 года. За указанный период Гренландия теряла

ежегодно более 200 миллиардов тонн льда. Средняя оценка составила 248 ± 36 км³/год. При этом уменьшение мощности ледового покрова происходило исключительно за счет южной части Гренландии. Масса льда в северных районах оставалась практически неизменной.

Согласно расчетам [38] обнародованным 10 августа 2006 года, Гренландия за период с апреля 2002 года до ноября 2005 года теряла за год в среднем 239 ± 23 км³ льда.

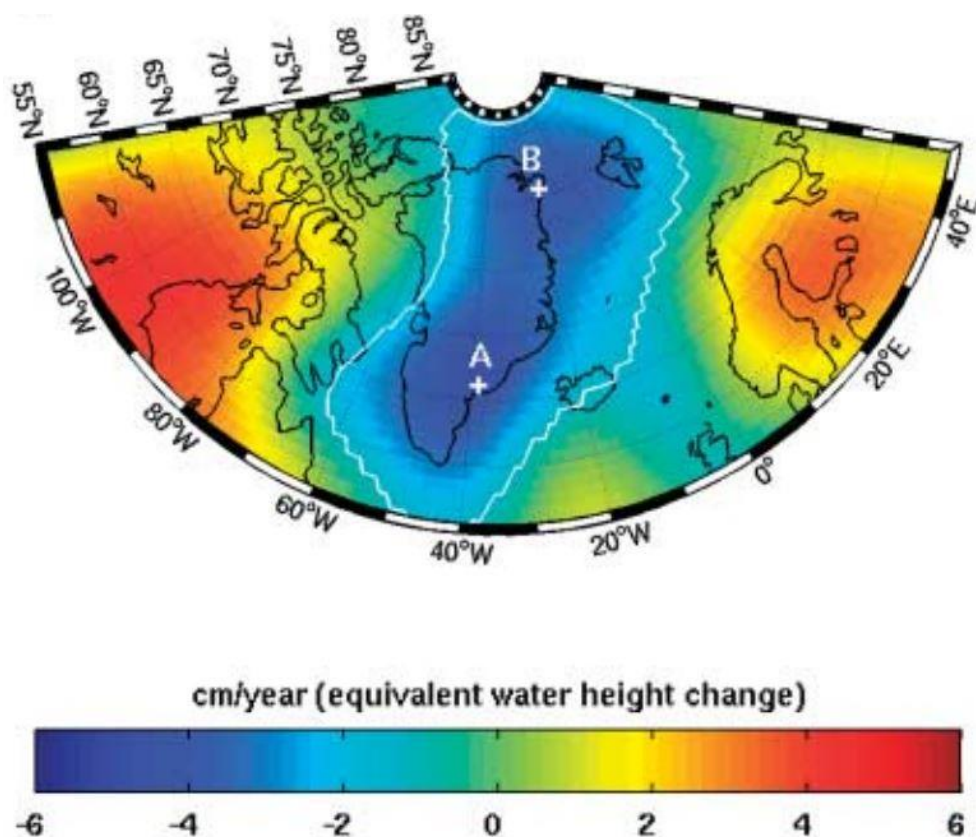


Рисунок 4.4.4 - Тренд АВЭМ для Гренландии и прилегающих регионов за период с апреля 2002 года по ноябрь 2005 года

4.5 Анализ АВЭМ для Северной Америки

Подготовленные ряды данных по Северной Америке были загружены в инструмент «LinearRegression» модуля «PixelBasedTools» в ArcMAP 10.3.

Результат работы инструмента по континенту Северная Америка представлен на рисунках 4.5.1-4.5.6.

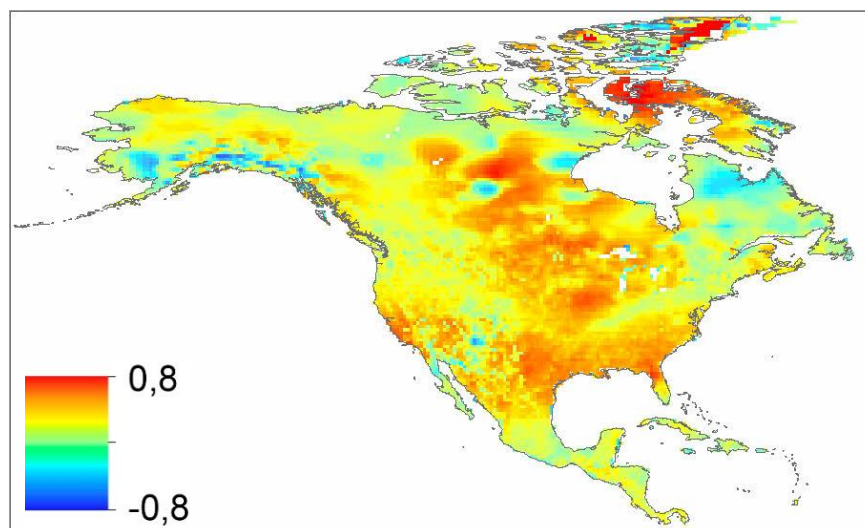


Рисунок 4.5.1 – Карта-схема корреляции индекса SPEI и данных об АВЭМ
(2002-2015 гг.)

Согласно рисунку 4.5.1, на большей территории Северной Америки установилась положительная связь между индексом SPEI и данными об АВЭМ. Рисунок 4.5.2 показывает, что эта связь статистически значимая. Для некоторых участков установилась зависимость: чем больше АВЭМ, тем больше доступной водной массы для испарения.

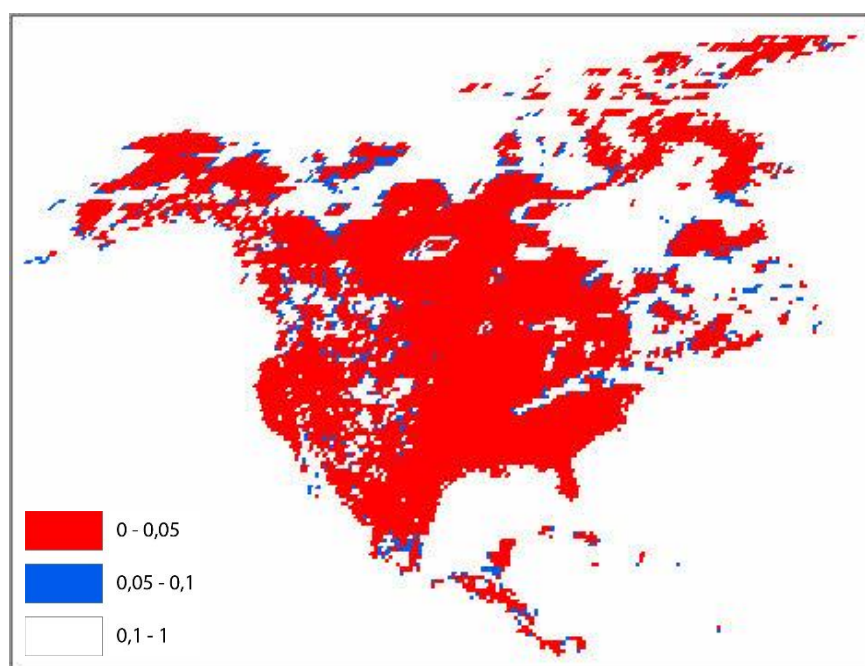


Рисунок 4.5.2 – Карта-схема значимости индекса SPEI и данных об АВЭМ
(2002-2015 гг.)

Рисунок 4.5.3 показывает, что на территории Северной Америки между данными о температуре и АВЭМ установилась отрицательная связь.

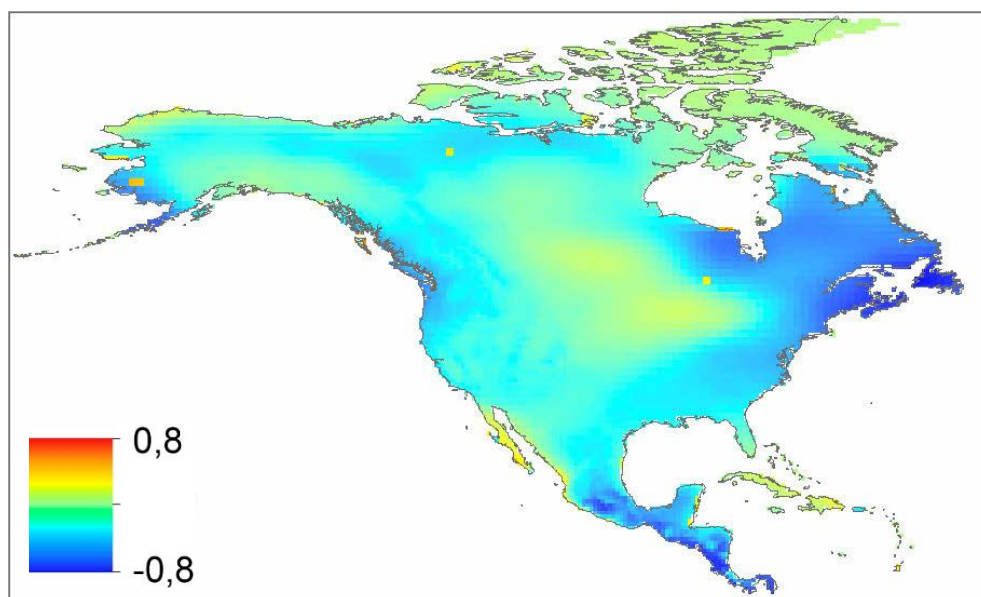


Рисунок 4.5.3 – Карта-схема корреляции данных о температуре и АВЭМ (2002-2015 гг.)

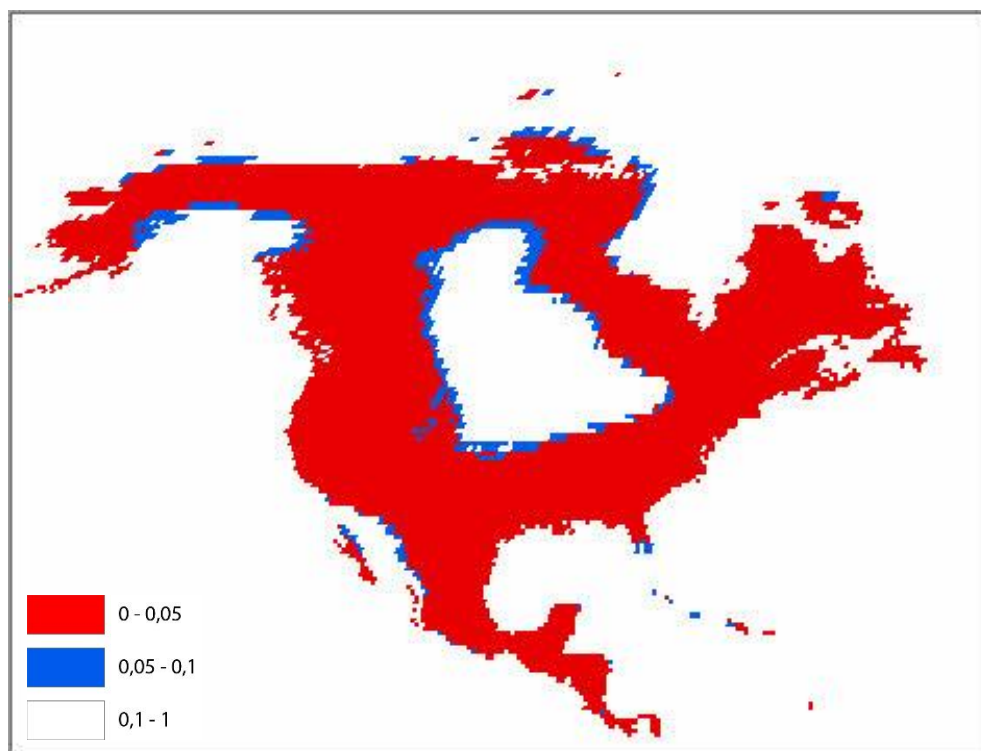


Рисунок 4.5.4 – Карта-схема значимости корреляции данных о температуре и АВЭМ (2002-2015 гг.)

Согласно рисунку 4.5.4, связь между данными о среднесуточной температуре и АВЭМ является статистически значимой. Чем больше температура, тем больше АВЭМ испаряется, тает и утекает по системе речной сети.

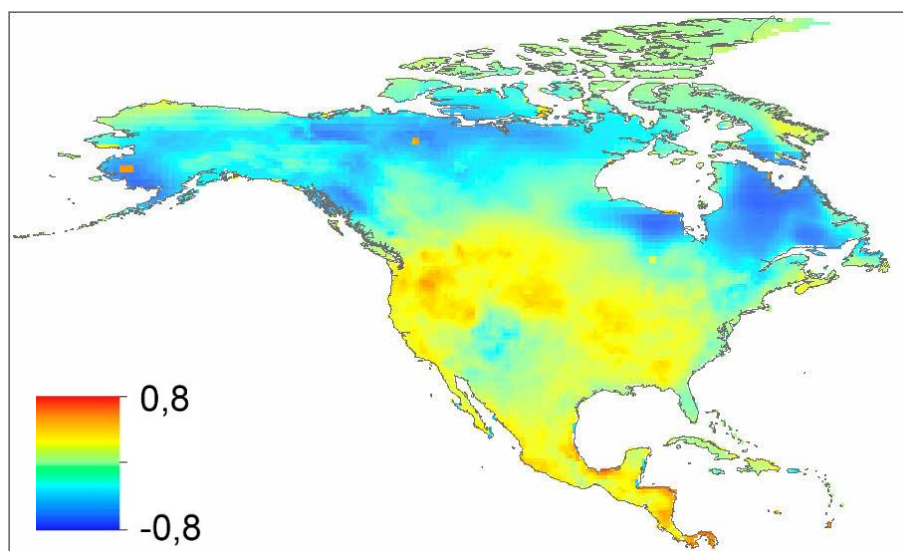


Рисунок 4.5.5 – Карта-схема корреляции данных об атмосферных осадках и АВЭМ (2002-2015 гг.)

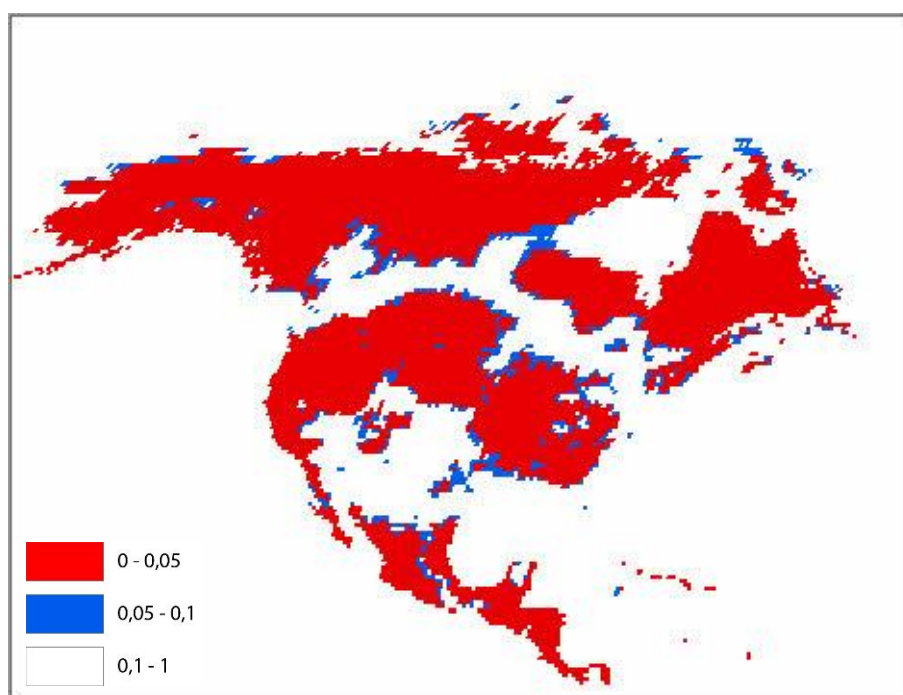


Рисунок 4.5.6 – Карта-схема значимости корреляции данных об атмосферных осадках и АВЭМ (2002-2015 гг.)

Карта-схема корреляции данных об атмосферных осадках и АВЭМ показывает (рисунок 4.5.5), что Северная Америка разделена на 3 зоны: в северной зоне связь отрицательная, в средней и южной — положительная. Согласно рисунку 4.5.6, данные связи являются статистически значимыми. Если имеется зависимость, это означает, что чем больше дождя было на данной территории, тем больше АВЭМ накопилось.

Для построения трендов (slope) подготовлен набор данных с абсолютно всеми данными (данные SPEI и метеорологические данные не приводились в соответствие с материалами GRACE).

Результат построения трендов и их значимости по Северной Америке представлен на рисунках 4.5.7-4.5.14.

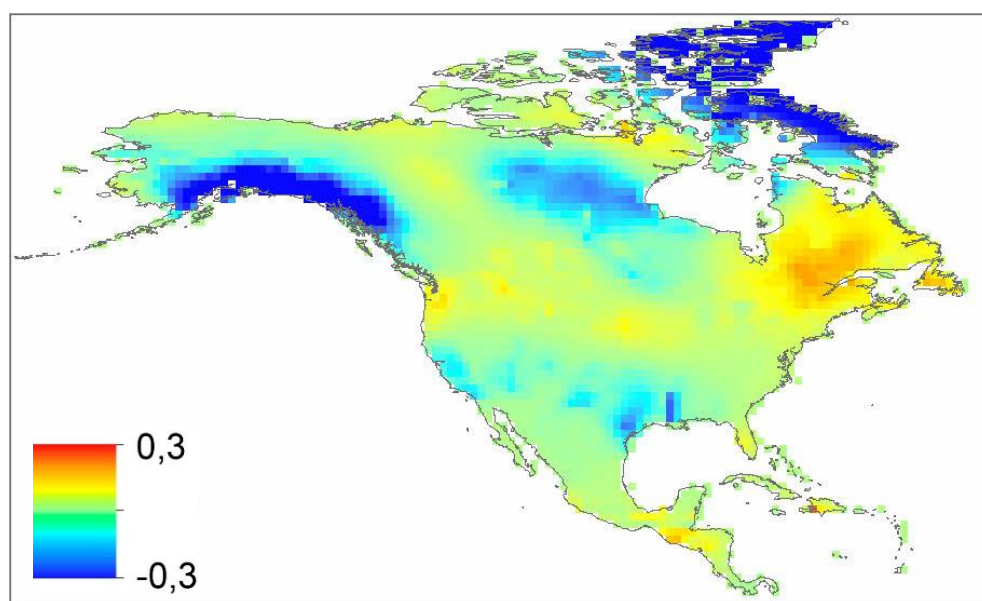


Рисунок 4.5.7 – Карта-схема трендов АВЭМ (2002-2015 гг.)

2 ярко синих зоны на севере и юго-западе свидетельствуют о долгом недостатке АВЭМ на данных территориях, что согласовывается с отчётом [1]. “Голубые” зоны – недостаток, который начал появляться относительно недавно.

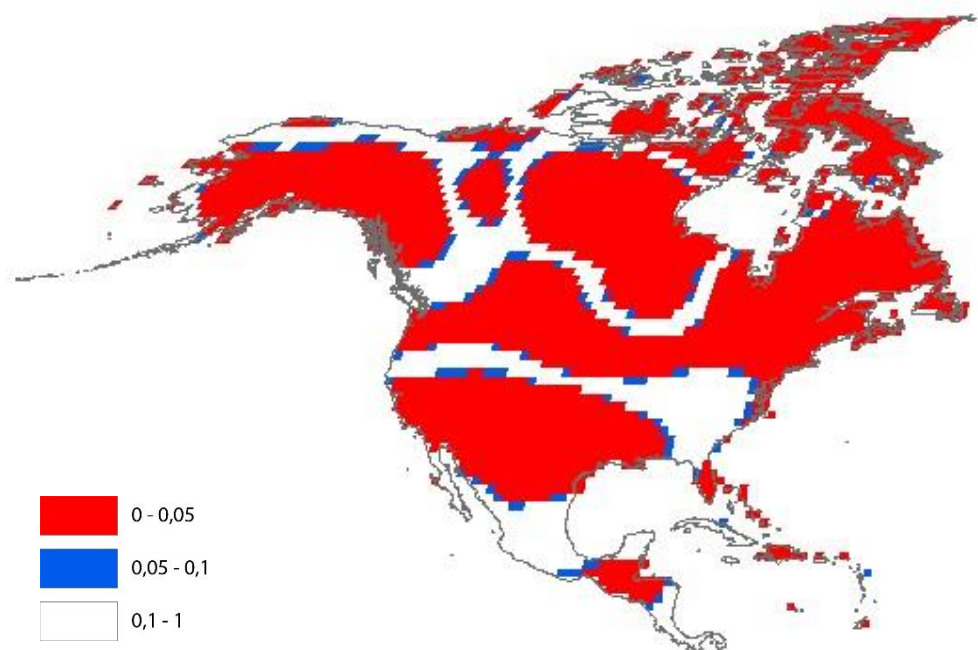


Рисунок 4.5.8 – Карта-схема значимости трендов АВЭМ (2002-2015 гг.)

Возрастающий тренд АВЭМ (рисунок 4.5.7) является статистически значимым (рисунок 4.5.8).

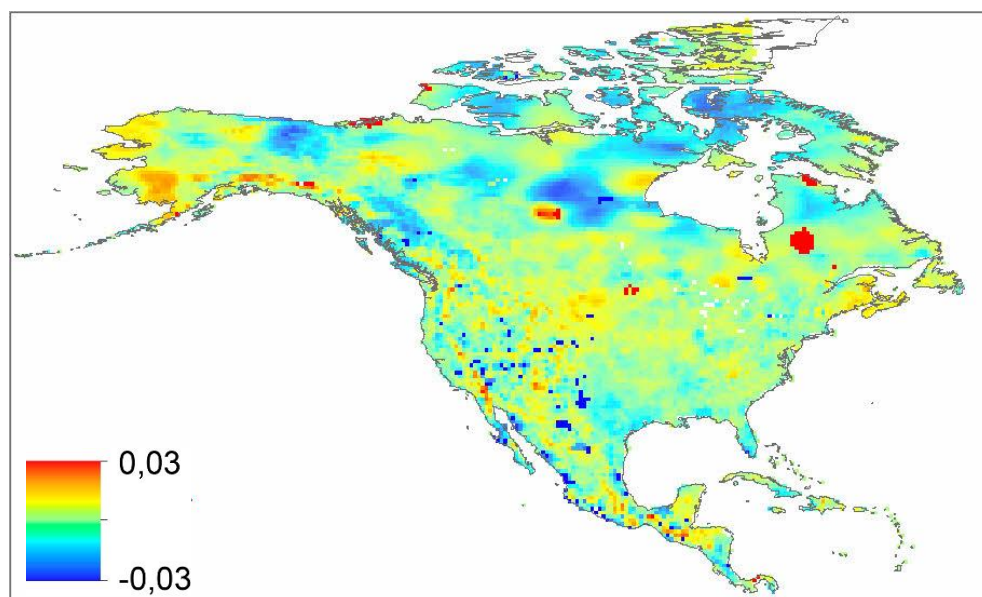


Рисунок 4.5.9 – Карта-схема трендов SPEI (2002-2015 гг.)

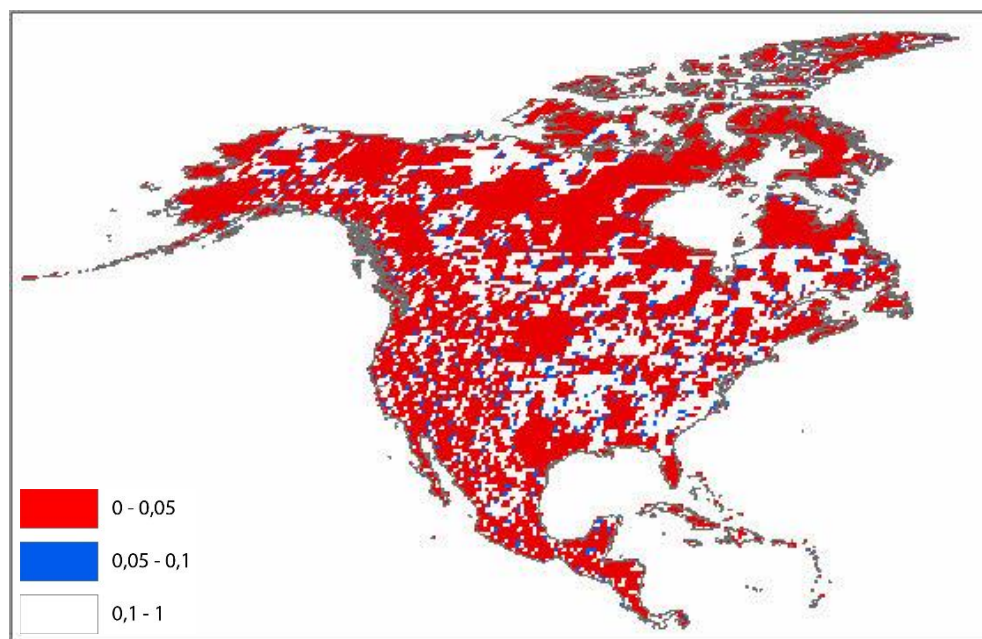


Рисунок 4.5.10 – Карта-схема значимости трендов SPEI (2002-2015 гг.)

На рисунке 4.5.9-4.5.10 представлены карта-схема трендов и значимости трендов SPEI. Отмечаются локальные значимые тренды.

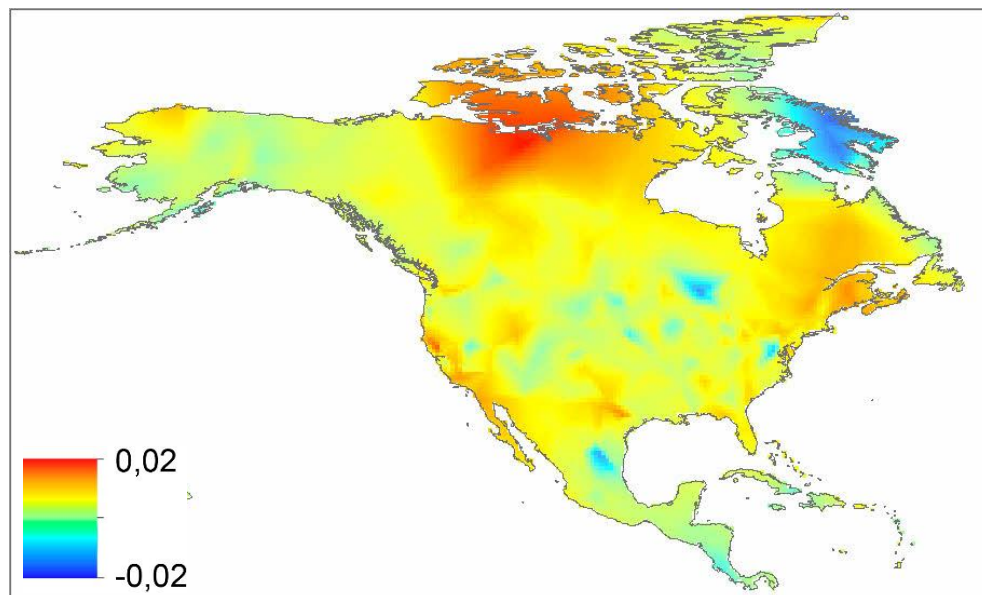


Рисунок 4.5.11 – Карта-схема трендов температуры (2002-2015 гг.)

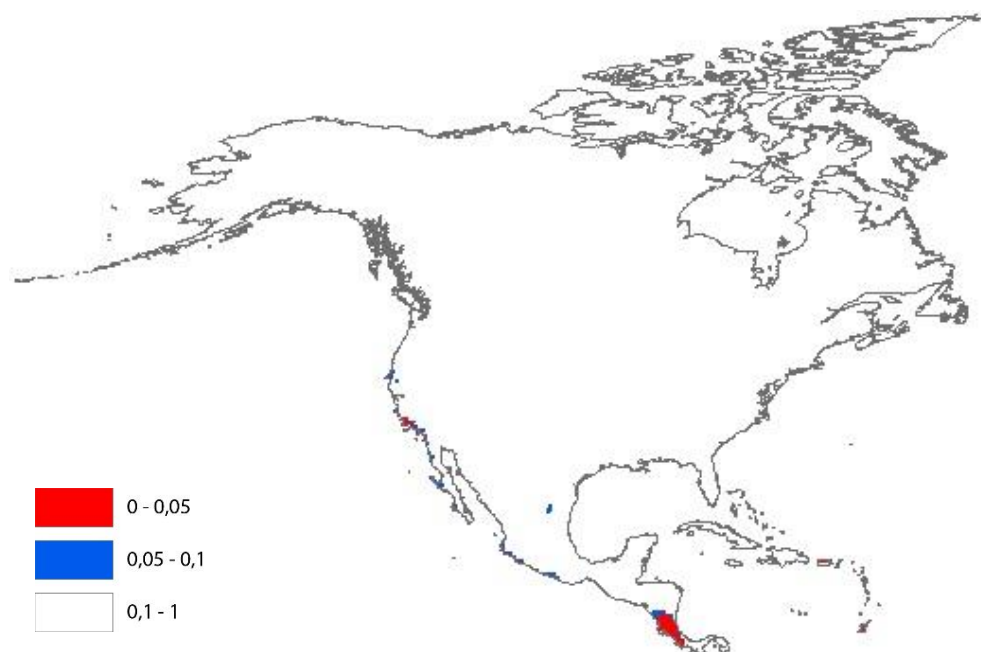


Рисунок 4.5.12 – Карта-схема значимости трендов температуры (2002-2015 гг.)

На рисунке 4.5.11 показан тренд температуры в пределах от 0.02 до -0.02. Данных тренд является незначимым (рисунок 4.5.12).

Согласно рисункам 4.5.13 и 4.5.14, возрастающий тренд атмосферных осадков является статистически незначимым.

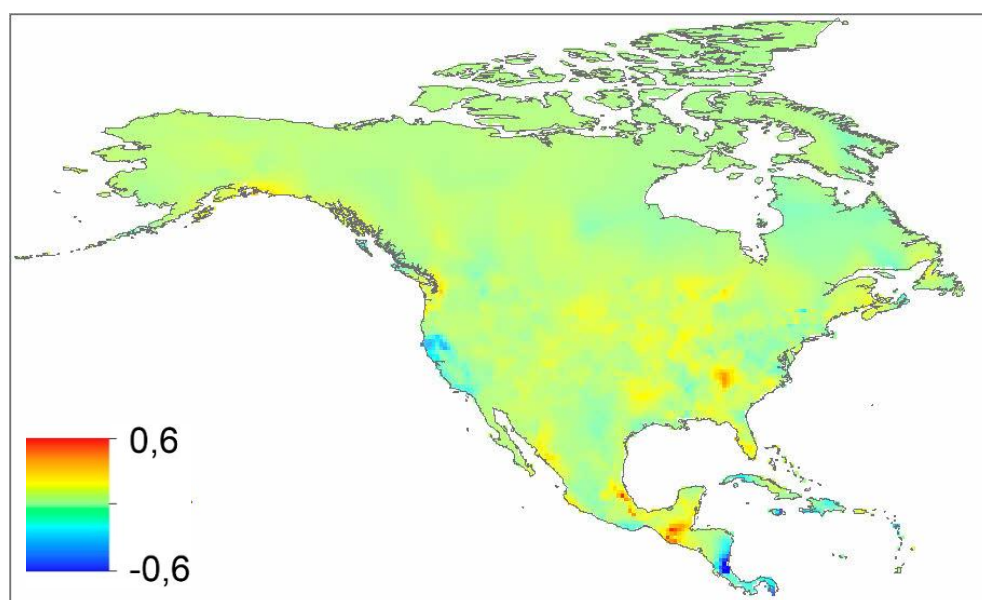


Рисунок 4.5.13 – Карта-схема трендов атмосферных осадков (2002-2015 гг.)

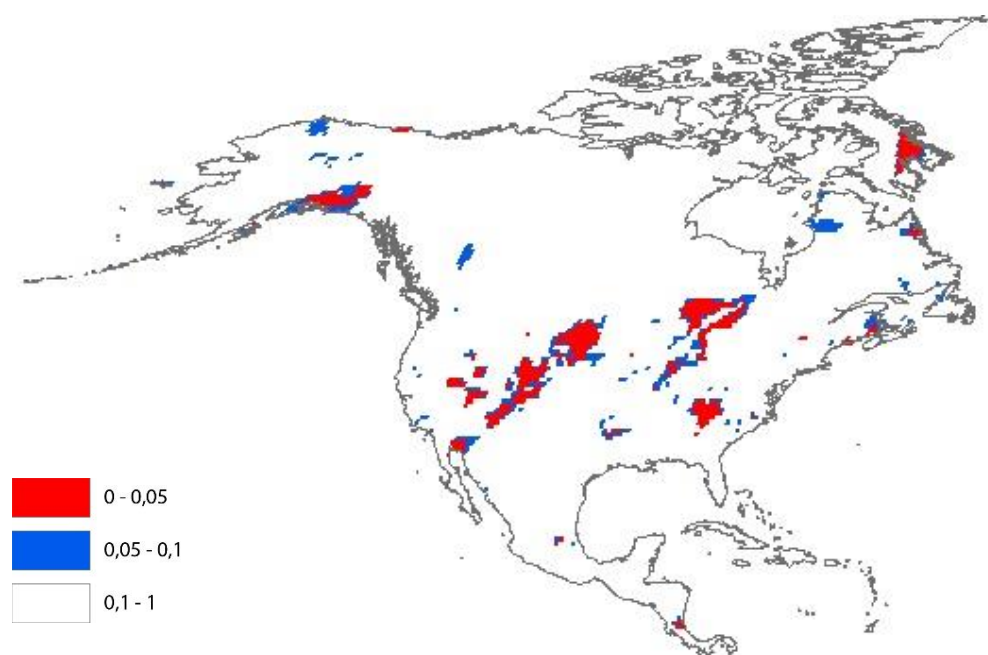


Рисунок 4.5.14 – Карта-схема значимости трендов атмосферных осадков (2002-2015 гг.)

Для Северной Америки вычислена статистика для набора каналов всех данных. Минимальные значения АВЭМ принимает с июня по октябрь в 2004, 2007, 2012 и 2015 годах. Данные по минимумам отображены на рисунке 4.5.16.



Рисунок 4.5.16 – График минимумов АВЭМ за июнь-октябрь 2002-2015 гг.

С помощью программного обеспечения STATISTICA 12.0 была вычислена значимость тренда P (0,000004) и величина коэффициента детерминации R^2 (0,84): изменения тренда являются статистически значимыми.

С помощью инструмента «CalculateIntegralNegative» построена модель (рисунок 4.5.17), которая вычисляет суммарные минимумы.

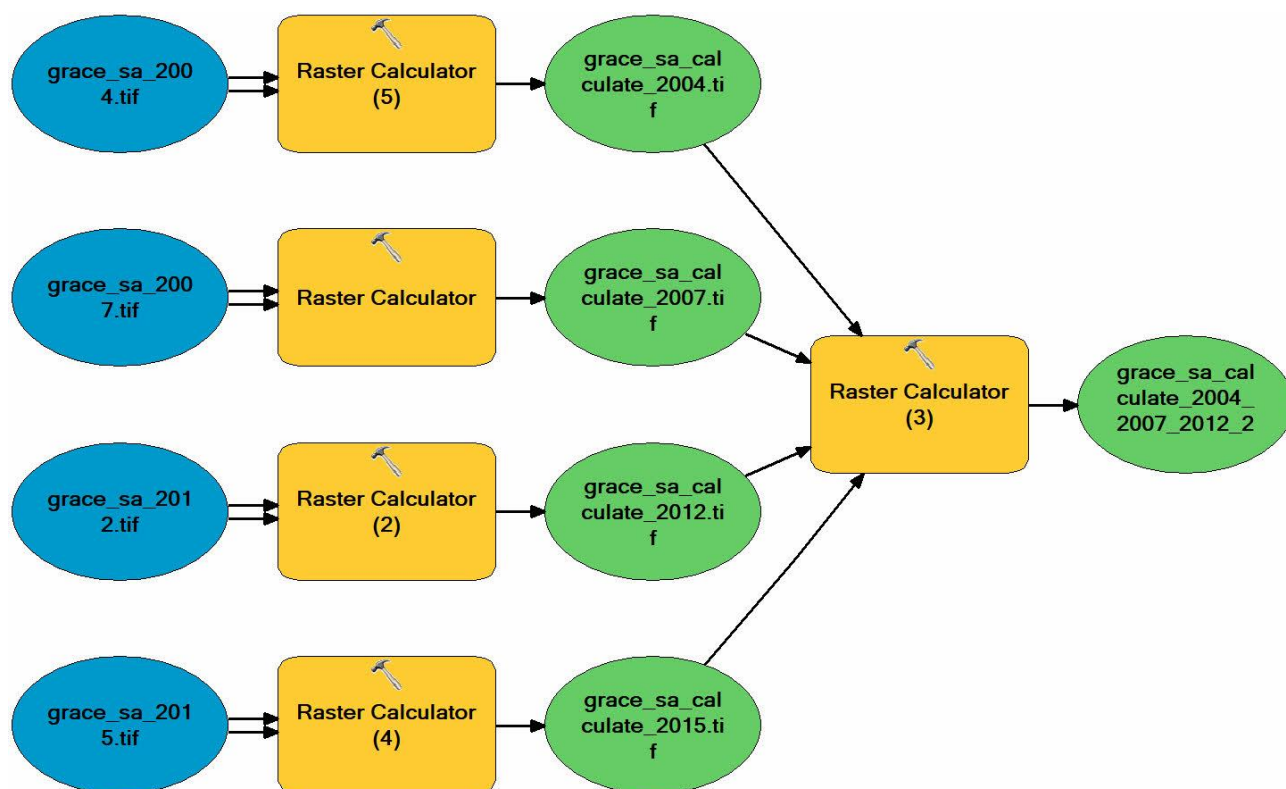


Рисунок 4.5.17 – Инструмент «Calculate Integral Negative». Модель для Северной Америки

На входе в модель – 4 файла с данными за период июнь-октябрь 2004, 2009, 2012 и 2013 гг. Звенья «Raster Calculator» содержат выражения, состоящие из заданных входных данных, значений, операторов и инструментов алгебры карт. На выходе – файл, содержащий данные по суммарным минимумам (рисунок 4.5.18).

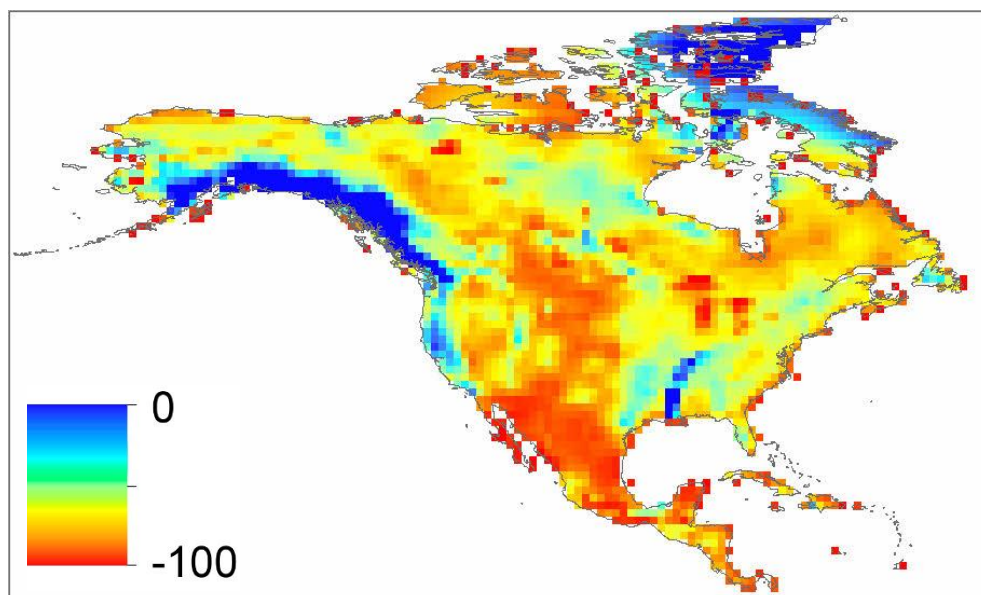


Рисунок 4.5.18 – Карта-схема суммарных минимумов АВЭМ

Результаты данного исследования согласовываются с работой автора [1]. Автор рассказывает об увеличении сильных осадков и ослаблении засух с середины XX века (в центральной части Северной Америки).

Карта-схема трендов АВЭМ (2002-2015 гг.) показывает возрастающий тренд в центральной части Северной Америки, что согласовывается с исследованием [39]. Авторы пишут, что АВЭМ восстанавливается после засухи 1999-2005 гг.

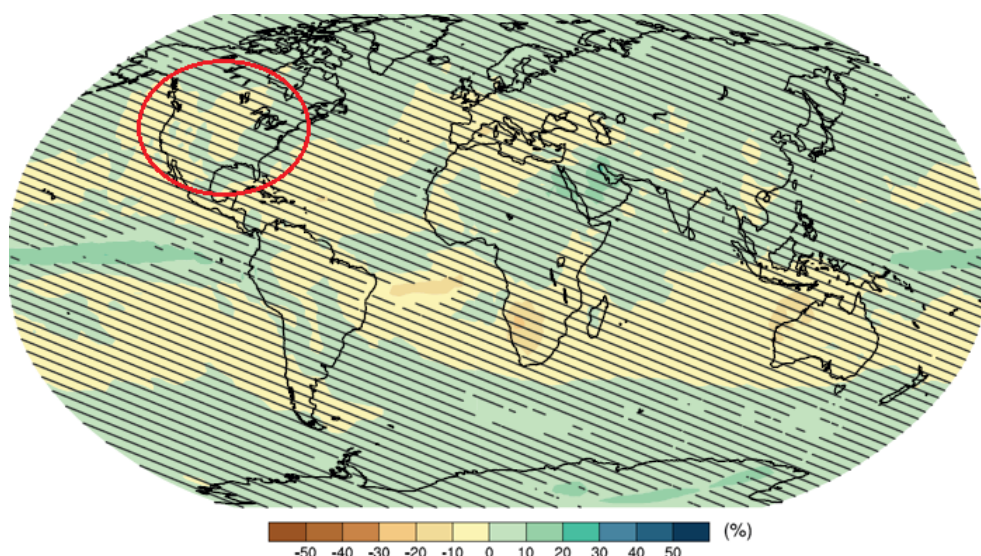


Рисунок 4.5.19 – Прогноз изменения осадков (%) (CMIP5, 2016-2035)

В отчёте [1] авторы прогнозируют уменьшение количества осадков на исследуемой территории на 10-20% (рисунок 4.5.19).

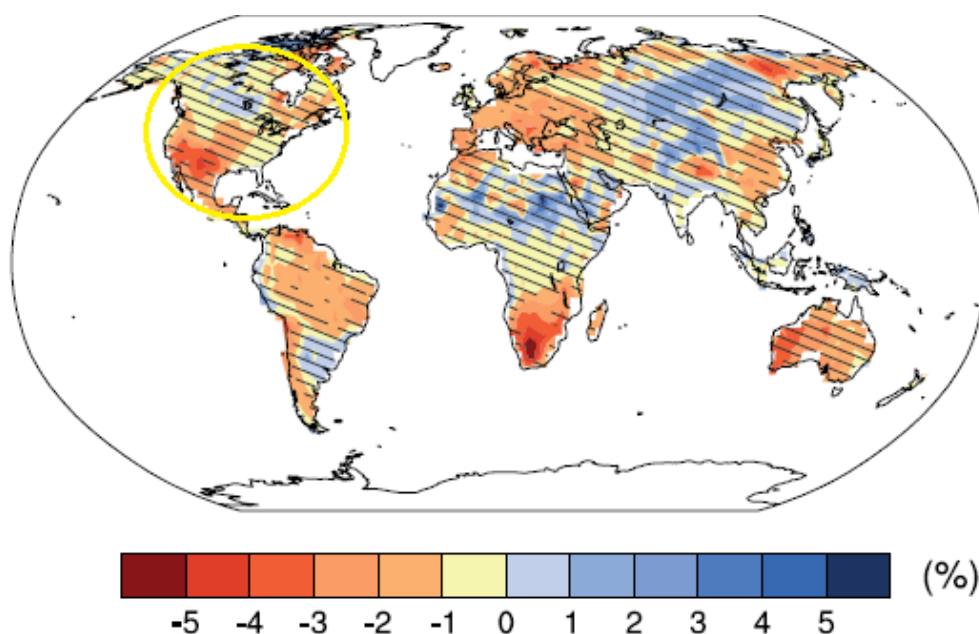


Рисунок 4.5.20 – Прогноз изменения влажности почвы (%) (CMIP5, 2016-2035)

Согласно прогнозам [1] (рисунок 4.5.20) влажность почвы на исследуемом объекте уменьшится на 0-4%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературы позволяет сделать вывод, что с помощью гравиметрической спутниковой съемки возможно оценить динамику АВЭМ. Представленные результаты показали согласованность с научными работами других авторов.

На большей территории Евразии установился возрастающий тренд АВЭМ. Выделяются зоны со значимыми возрастающими и убывающими трендами (Гималаи и Сирия, где отмечается убывающий тренд и Китай - возрастающий тренд), что подтверждено данными из отчёта IPCC 2013 [1]. График минимумов АВЭМ за июнь-октябрь 2002-2015 гг. показывает значимый убывающий тренд ($P=0,004$, $R^2=0,51$). Карта-схема суммарных минимумов АВЭМ за июнь-октябрь 2002-2015 согласовывается с трендом за весь период наблюдения.

Горная система Гималаи и Тибетское плато разделены друг от друга с помощью SRTM. На горной системе отмечается убывающий тренд ($P=0.001$ и $R^2=0.60$), на плато – возрастающий ($P=0.08$ и $R^2=0.23$), что возможно связано с таянием горных льдов - водная масса тает и утекает по системе речной сети. Увеличение АВЭМ в области плато связано с особенностями рельефа, накапливаемой на Тибетском плато водной массе нужно время чтобы испариться или стечь.

Для острова Гренландия построена карта-схема трендов АВЭМ, на которой отмечается, что в целом на острове установился значимый убывающий тренд ($R^2 = 0,97$). Карта-схема трендов АВЭМ показывает, что самая большая потеря водной массы наблюдается на юго-западной части материка, что согласуется с докладом IPCC 2013 [1]. Однако, в статье [38] отмечались 2 точки экстремумы убывания АВЭМ, в данном исследовании замечена только 1 точка.

Карта-схема трендов АВЭМ показывает возрастающий тренд в центральной части Северной Америки, что согласовывается с исследованием [39] (АВЭМ восстанавливается после засухи 1999-2005 гг.). Выделяются зоны со значимыми убывающими трендами (северо-восток, юго-запад), что

подтверждено данными из отчёта IPCC 2013. График минимумов АВЭМ за июнь-октябрь 2002-2015 показывает значимый убывающий тренд.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АВЭМ — аномалии водного эквивалента массы.

ВМО (WMO) — Всемирная метеорологическая организация (World Meteorological Organization).

CRU TS — Climatic Research Unit Timeseries.

GRACE — Gravity Recovery And Climate Experiment.

SPEI — Standardized Precipitation Evapotranspiration index.

SPI — Standardized Precipitation index.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Изменение климата 2013 г. Физическая научная основа / Межправительственная группа экспертов по изменению климата. — Женева, 2013. — 222 с.
- 2 Киселёв, А. В. Связь запасов продуктивной влаги в почве с полем силы тяжести Земли (по данным съёмок спутниками GRACE) / А.В. Киселёв, Н.Р. Муратова, В.И. Горный, А.А. Тронин. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Том. 12. - 2015. - № 6. - С. 7-16.
- 3 Zhaoa, Q. Variations in China's terrestrial water storage over the past decade using GRACE data / Q. Zhaoa, W. Wua, Y. Wuc // Geodesy and Geodynamics. Vol. 6. - 2015. - № 3. - P. 187–193.
- 4 Shena, C. Trends in gravity changes from 2009 to 2013 derived from ground-based gravimetry and GRACE data in North China / C. Shena, S. Xuana, Z. Zoua, G. Wua // Geodesy and Geodynamics. Vol. 6. - 2015. - № 6. - P. 423–428.
- 5 Булычёв, А. А. Использование спутниковой системы GRACE для мониторинга изменений для мониторинга изменений водных ресурсов / А. А. Булычёв, Р. Г. Джамалов, Р. В. Сидоров. - Москва : Техника и технологии, 2011. – С. 24-27.
- 6 Reager, T. Characteristic mega-basin water storage behavior using GRACE / T. Reager, S. Famiglietti // WATER RESOURCES RESEARCH. Vol. 49. - 2013. - P. 3314–3329
- 7 Thomas, A. A. GRACE-based water storage deficit approach for hydrological drought characterization / A. Thomas, J.Reager, J. Famiglietti, M. Rodell // Geophysical Research Letters. - 2014. - V. 41, № 5. - P. 1537–1545.
- 8 Svendsen, P. L. Acceleration of the Greenland ice sheet mass loss as observed by GRACE: Confidence and sensitivity / P. L. Svendsen, O.B. Andersen, A. A. Nielsen // Earth and Planetary Science Letters. - 2013. - V. 364. - P.24-29.
- 9 Коновалов, В.Г. Регионализация и регрессионный анализ температуры воздуха и осадков в глобальной БД по климату / В.Г. Коновалов, В.В.

Мацковский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Том 8. - 2011. - №3. - С.283-289

10 University of East Anglia - Climatic Research Unit [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://www.cru.uea.ac.uk/data>

11 Семёнова, И. Г. Оценка пространственно-временного распределения засух на Украине в вегетационный период / И. Г. Семёнова // Одесский государственный экологический университет. - 2014. - С. 134-146.

12 Kumara, K. On the observed variability of monsoon droughts over India / K. Kumara, M. Rajeevanb, D. Paic, A. Srivastavac, B. Preethid. - Weather and Climate Extremes. Vol. 1. - 2013. - P. 42–50.

13 Ледяной покров Гренландии «стремительно тает» — Наука и техника — BBC Russian [сайт]. [Электронный ресурс]: — Режим доступа: http://www.bbc.com/russian/science/2009/11/091112_greenland_ice_loss

14 В таянии ледяного покрова Гренландии виноват Исландский плюм | Новосибирский государственный университет [сайт] [Электронный ресурс]: — Режим доступа: <http://nsu.ru/0260f94d34d66a5e339eaf38b12d5fc3>

15 Climate at a Glance | National Centers for Environmental Information (NCEI) [Электронный ресурс]: - Режим доступа : <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/>

16 Любов, М. С. Физическая география материков и океанов : учебное пособие / М. С. Любов. - Арзамас : Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2015. - 147 с.

17 Central Tibetan Administration - About Tibet [сайт]. [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://tibet.net/about-tibet>

18 Корякин, Е.Д. Гравиметрическая и сейсмическая изученность Гренландии и окружающих акваторий. Предварительная интерпретация полученных данных / Е. Д. Корякин, П. А. Строев, А. Н. Грушинский // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. - 2004. - № 6. - С. 56-63.

19 Корнева, И. А. Современные изменения температуры земной поверхности и потока поглощенной радиации в регионе Гренландии / И. А.

Корнева, И. О. Попов, С. М. Семенов // Труды главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. - 2011. - № 563. - С. 77-93

20 GRACE - Gravity Recovery and Climate Experiment [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://www.csr.utexas.edu/grace>

21 Зотов, Л. В. Использование спутниковой системы измерения поля гравитации Земли (GRACE) для оценки водного баланса крупных речных бассейнов / Л. В. Зотов, Н. Л. Фролова, В. Ю. Григорьев, М. А. Харламов. – Москва : Вестник Московского университета. Серия 5. География. - 2015. - № 4. С. – 28.

22 GRACE Tellus: Monthly Mass Grids - Land Download [Электронный ресурс]: - Режим доступа : <http://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/monthly-mass-grids-land/>

23 Климатический профиль Кыргызской Республики / Ш. Ильясов Ш, О. Забенко, Н. Гайдамак, А. Кириленко, Н. Мырсалиев, В. Шевченко, Л. Пенкина. – Бишкек : Государственное агентство охраны окружающей среды и лесного хозяйства, 2013. – 68 с.

24 DIGITAL.CSIC: SPEIbase v.2.4 Download [Электронный ресурс]: - Режим доступа : <http://digital.csic.es/handle/10261/128892>

25 Кожухметова, Э. П. Точность воспроизведения температуры воздуха и осадков на территории Казахстана климатическим архивом CRU TS 2.1 / Э. П. Кожухметова, А. Р. Загидуллина, Т. Б. Аппазова // Гидрометеорология и экология. - 2013. - № 3. - С. 30-42.

26 CRU TS Version 3.24 [Электронный ресурс]: - Режим доступа : https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_3.24/

27 Об утверждении Методических рекомендаций по социально-гигиеническому мониторингу : приказ Роспотребнадзора от 20.09.2010 № 341.

28 Шипунов, А. Б. Работа с двумя переменными / А. Б. Шипунов, А. И. Коробейников, Е. М. Балдин // Linux Format. - 2008. - №9. - С. 96-99; №10. - С. 88-91.

29 Бахрушин, В. Е. Методы оценивания характеристик нелинейных статистических связей / А. Е. Бахрушин // Системные технологии. -2011. – № 2. – С. 9–14.

30 Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). - Москва, 2014. - 60 с.

31 Информационный бюллетень «Изменение климата» / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). - Москва, 2015. - № 55. - С. 1-24.

32 Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2015 год / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). – Москва, 2016. – 68 с.

33 Youa, Q. An overview of studies of observed climate change in the Hindu Kush Himalayan (HKH) region / Q. Youa, G. Renb, Y. Zhanga, Y. Renb, X. Suna, Y. Zhanb, A. Shresthad, R. Krishnane // Advances in Climate Change Research. - 2017. - P. 1-7.

34 Zhong, L. Accelerated changes of environmental conditions on the Tibetan Plateau caused by climate change / L. Zhong, Z. Su, M. Salama, J. Sobrino // Journal of Climate. – 2011. – P. 6540–6550.

35 Xiaodong, L. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades / L. Xiaodong, C. Baode // International Journal of Climatology. - 2000. – V. 20, № 14. – P. 1729–1742.

36 Киселёв, А. В. Индикация опасных природных явлений вариациями гравитационного поля Земли (по данным спутниковых съемок системой GRACE) / А. В. Киселёв, В. И. Горный, С. Г. Крицук, А. А. Тронин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - Санкт-Петербург, 2016. - Т. 13, № 6. - С. 13-28.

37 Velicogna, I. Acceleration of Greenland ice mass loss in spring 2004 / I. Velicogna, J. Wahr // Nature. - 2006. - № 443. - P. 329-331

38 Chen, J. L. Satellite Gravity Measurements Confirm Accelerated Melting of Greenland Ice Sheet / J. L. Chen, C. R. Wilson, B. D. Tapley // Science. - 2006.

39 Hanshenga, W. Water storage changes in North America retrieved from GRACE gravity and GPS data / W. Hanshenga, X. Longweia, J. Luluc, W. Patrickd, S. Holgere, J. Liminga, S. Qianga // Geodesy and geodynamics. - 2015. - V. 6, № 4. - P. 267-273.